МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БІЛЯЄВА ВІКТОРІЯ ВІТАЛІЇВНА

УДК 66.013.8:[504.5:623 459](043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ШКІДЛИВИХ ФАКТОРІВ ТА ЗАХИСТУ ПРАЦІВНИКІВ НА ОБ'ЄКТАХ ПАЛИВНО–ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

05.26.01 – охорона праці
19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

В. В. Біляєва
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Дніпро – 2022

АНОТАЦІЯ

Біляєва В. В. Наукові основи оцінки шкідливих факторів та захисту працівників на об’єктах паливно-енергетичного комплексу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.26.01 «Охорона праці» (19 – Архітектура та будівництво). – Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2022.

Дисертацію присвячено розробці інструментарію оцінювання рівня небезпеки в робочих зонах на території об’єктів паливно-енергетичного комплексу та визначення ефективності зниження рівня хімічного та пилового забруднення повітря шляхом моделювання процесів та використання спеціальних інженерних рішень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в науковому та практичному обґрунтуванні оцінки рівня небезпеки в робочих зонах на території об’єктів паливно-енергетичного комплексу та визначення ефективності застосування засобів захисту з урахуванням моделювання процесів забруднення робочих зон та спеціальних інженерних рішень.

При цьому одержано такі наукові результати:

вперше:

– розроблено науково-методичний інструментарій прогнозування формування шкідливих факторів у робочих зонах та оцінювання ефективності впровадження заходів захисту на базі високоефективних CFD-моделей;

– науково обґрунтовано ефективність використання екранів спеціальної форми, які розташовують біля штабеля вугілля з метою зниження рівня пилового забруднення робочих зон на промислових майданчиках; для

обґрунтування параметрів цих екранів розроблено метод розрахунку концентрації пилу в робочих зонах, який враховує форму штабеля вугілля, форму екрана, метеоумови;

– розроблено комплексну методологію оцінювання ефективності зволоження поверхні штабеля вугілля та подавання води в пилову хмару біля штабеля, що здійснюються для створення нормальних умов праці на промислових майданчиках;

– розроблено комплексну методологію оцінювання ефективності використання водяної завіси, що застосовується для забезпечення вимог охорони праці шляхом екранування теплових потоків, які виникають під час пожежі; методологія дозволяє прогнозувати зниження температури повітря біля джерела пожежі з урахуванням динаміки випарювання крапель води, місця створення завіси, метеоумов, наявності будівель біля місця пожежі;

– розроблено метод, що дозволяє виконувати дослідження щодо визначення ефективності використання шумозахисних екранів, які встановлюють біля залізничної колії; метод дозволяє враховувати складну геометричну форму екранів, їхнє положення відносно джерела шуму, рельєф місцевості;

– науково обґрунтовано ефективність використання бар’єрів спеціальної форми, які розташовують біля автомагістралей з метою зниження рівня хімічного забруднення робочих зон; для обґрунтування параметрів цих бар’єрів створено інструментарій, що базується на використанні розроблених чисельних моделей та дозволяє визначати концентрацію забруднюючих речовин у робочих зонах з урахуванням форми бар’єрів, рельєфу, положення джерела емісії, хімічної трансформації домішок, метеоумов;

– розроблено багатофакторну чисельну модель для оцінювання ризику хімічного або термічного ураження водолазів під час виконання ремонтних робіт на пошкоджених підводних трубопроводах; модель дозволяє враховувати гідродинаміку течії водного потоку, інтенсивність емісії хімічно небезпечної речовини з пошкодженого підводного трубопроводу,

геометричну форму підводної траншеї, де розташовано трубопровід, температуру води біля пошкодженого підводного трубопроводу;

дістало подальший розвиток:

– інженерний метод розрахунку процесу «захоплення» краплею води часток пилу, що дозволяє врахувати динаміку «приєднання» часток пилу до краплі залежно від фізичних параметрів краплі, концентрації часток пилу та крапель, їх руху в повітряному середовищі й здійснити більш коректну оцінку ефективності знепилення повітря в робочих зонах;

– методологічні засади технології зниження рівня пилового забруднення в робочих зонах за рахунок застосування спеціальних бортів та екранів складної форми на вагонах, що транспортують вугілля; розроблено метод для оцінювання ефективності використання таких засобів зменшення виносу пилу з вагонів;

– математична модель прогнозування інтенсивності забруднення в робочих зонах промислових майданчиків при інверсії та штилі, що дає можливість оперативно визначити концентрації забруднюючих речовин з урахуванням розміру джерела емісії шкідливих речовин, профілю швидкості вітру, напряму вітру;

– математична модель для оцінювання пилового забруднення повітря всередині автотранспорту, що рухається територією теплової електростанції (ТЕС); модель дозволяє, на відміну від існуючих, швидко здійснити розрахунок рівня пилового забруднення повітря з урахуванням аеродинаміки повітряного потоку на робочих місцях у автотранспорті;

– математична модель оцінювання ефективності використання всмоктувальних пристроїв (вентиляторів) для зниження рівня забруднення повітря біля автотрас; модель дозволяє, на відміну від існуючих, швидко враховувати різне положення всмоктувальних поверхонь, вплив корпусу автотранспорту на аеродинаміку повітряного потоку та поширення домішки в робочих зонах;

удосконалено:

– математичну модель для експрес-оцінювання ризику виникнення пожежі в сховищах внаслідок самонагрівання палива, що має рослинне походження; модель дозволяє швидко розрахувати розвиток теплового поля в насипу палива з урахуванням форми насипу, температури навколишнього середовища, теплофізичних властивостей палива;

– метод розрахунку теплового забруднення повітря в робочих приміщеннях при припливі в них нагрітого повітря та розрахунку нагрівання конструкцій споруд при взаємодії з потоком нагрітого повітря, що дозволяє врахувати форму споруд, метеоумови, форму робочого приміщення, теплофізичні параметри матеріалів конструкції.

Розроблений комплекс математичних моделей, методів та алгоритмів є підставою для обґрунтування організаційно-технічних заходів, які спрямовані на зниження негативного впливу шкідливих факторів на підприємствах паливно-енергетичного комплексу України в разі їх виникнення під час функціонування об’єктів або виявлення на стадії проєктно-дослідницьких робіт, що спрямовані на вдосконалення методів зниження негативних факторів на працівників.

Використовуючи отримані в роботі математичні моделі та методи з програмно-реалізованими алгоритмами, можна визначити гранично допустимі значення чинників для запобігання виникненню професійних захворювань та травмуванню працівників і вдосконалити засоби та методи захисту працівників, а саме:

– на базі створених чисельних моделей розроблено пакети прикладних програм (коди), що дозволяють методом обчислювального експерименту визначати закономірності формування областей хімічного, пилового та теплового забруднення в робочих зонах на об’єктах паливно-енергетичного комплексу. Вони не вимагають значного часу на розробку, установку, мають помірну вартість. Для практичного використання методів зниження рівня хімічного та пилового забруднення робочих зон не потрібно застосовувати спеціальне обладнання;

– виконання обчислювальних експериментів на базі створених чисельних моделей дозволяє зменшити роль дорогого фізичного експерименту при розв’язанні складних прикладних задач, що пов’язані з визначенням рівня небезпеки для здоров’я працівників при дії промислових джерел хімічного, пилового та теплового забруднення;

– запропонований інженерний метод боротьби з пилом під час перевезення вугілля або його зберігання в штабелях дозволяє ефективно зменшити рівень забруднення робочих зон;

– запропонований інженерний метод боротьби із забрудненням повітря робочих зон біля автотрас дозволяє ефективно зменшити рівень хімічного забруднення робочих зон;

– запропонована динамічна чисельна модель для оцінювання ефективності водяної завіси дозволяє в режимі реального часу визначити зниження інтенсивності теплових потоків, що виникають у випадку пожежі, та може бути використана для організації науково обґрунтованої системи захисту пожежників;

– розроблені чисельні моделі та створене на їх базі програмне забезпечення впроваджені в Державній службі України з надзвичайних ситуацій в Дніпропетровській області (ДСНС України) для оцінювання рівня небезпеки в робочих зонах.

Здійснено аналіз шкідливих факторів, що виявлені на об’єктах паливно-енергетичного комплексу. Виконано критичний аналіз літературних джерел, присвячених досліджуваній проблеми. Виявлено, що в країнах Євросоюзу, США для оцінювання рівня небезпеки в робочих зонах найбільш активно застосовуються чисельні моделі (CFD-моделі), що дозволяють отримати детальнішу інформацію про розподіл факторів небезпеки, а також, що особливо важливо, здійснити аналіз ефективності різних засобів, які використовуються на виробництві для забезпечення нормальних умов праці. Це дає можливість вже на етапі ескізного проєктування систем захисту визначити, чи дозволяє ця система забезпечити нормальні умови праці, та, у

разі потреби, внести зміни в проєкт на початковому етапі з метою усунення визначених недоліків. Такий підхід забезпечує найбільш раціональне використання ресурсів при створенні систем захисту працівників, зменшення частки фізичного (дорогого) експерименту, гарантує ефективне використання системи захисту та безпосередньо впливає на зниження вартості проєкту. Водночас в Україні існує дефіцит таких моделей, і для розв'язання задач з оцінювання рівня небезпеки в робочих зонах використовуються переважно спрощені математичні моделі та інженерні методики. Такі моделі практично не дозволяють виконати оцінювання ефективності використання різних засобів, що застосовуються для забезпечення нормальних умов праці на виробництвах. Тому існує важлива задача з розробки багатофакторних чисельних моделей.

Наведено результати наукових досліджень зі створення багатофакторних чисельних моделей, що дозволяють здійснити оперативний розрахунок з визначення закономірностей розподілу факторів небезпеки в робочих зонах біля автотрас (хімічне забруднення), залізничних магістралей (шумове забруднення) та визначити ефективність застосування захисних бар'єрів спеціальної форми, що використовуються для зменшення впливу факторів небезпеки на працівника. У цьому розділі показано, що використання захисних бар'єрів спеціальної форми, що запропоновані в дисертації, дозволяє зменшити рівень хімічного забруднення біля автотрас. Побудовано чисельну модель, що дає можливість здійснити оцінювання ефективності використання сорбуючих поверхонь («TX active surface») на захисному екрані та на стінках будівель для зменшення рівня хімічного забруднення робочих зон. Запропонована ефективна чисельна модель, що дозволяє визначити ефективність використання шумозахисних екранів складної форми біля залізниці. У цьому розділі наведено результати комплексу обчислювальних та фізичних експериментів.

Наведено результати експериментальних досліджень та опис побудованих багатофакторних чисельних моделей для аналізу ефективності

використання додаткових бортів спеціальної форми та спеціальних екранів на вагонах з вугіллям, що дозволяють зменшити рівень пилового забруднення робочих зон біля транспортної магістралі.

Описано багатофакторну чисельну модель, що дозволяє оцінювати рівень хімічного або пилового забруднення повітря в робочих зонах на промислових майданчиках ТЕС у випадку викидів за несприятливих метеоумов. Далі в розділі наведено результати експериментальних досліджень та опис побудованих багатофакторних чисельних моделей для аналізу ефективності використання захисних екранів різної форми, що застосовуються для зменшення рівня пилового забруднення робочих зон на майданчиках, де розташовуються штабелі вугілля. У розділі наведено чисельну модель для оцінювання рівня пилового забруднення всередині автотранспорту, що рухається територією ТЕС. Зокрема, наводиться нова чисельна модель, що дозволяє визначати ефективність зволоження штабеля вугілля з метою зменшення виносу пилу від поверхі штабеля. Також у цьому розділі наведено розроблену чисельну модель, що дозволяє визначити ефективність використання подавання води в пилову хмару, що формується біля штабеля вугілля.

Наведено опис побудованих багатофакторних чисельних моделей для аналізу ризику термічного та хімічного ураження водолазів під час робіт біля пошкоджених підводних трубопроводів.

Наведено опис побудованих багатофакторних чисельних моделей для аналізу ризику термічного ураження працівників під час пожежі та визначення ефективності використання водяної завіси з метою зменшення ризику термічного ураження працівників біля осередку пожежі.

Ключові слова: охорона праці, робоча зона, хімічне забруднення, пилове забруднення, термічне забруднення, термічне ураження працівників, чисельні методи, захист робочих зон від хімічного та пилового забруднення, захисні екрани, водяна завіса, пилопригнічення.

SUMMARY

Biliaieva V. V. Scientific bases of assessment of harmful factors and protection of workers on the territory of fuel and energy enterprises. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of doctor of technical sciences in specialty 05.26.01 «Labour protection» (19 – Architecture and Civil Engineering). – State Higher Educational Establishment «Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2022.

The dissertation is devoted to the development of a toolkit for assessing the level of danger in work zones on the territory of the fuel and energy complex facilities and determining the effectiveness of reducing the level of chemical and dust pollution of the air through the use of process modeling and special engineering solutions.

Scientific novelty of the results obtained in the dissertation:

The scientific novelty of the obtained results lies in the scientific and practical substantiation of the assessment of the level of danger in the working zones on the territory of the facilities of fuel and energy complexes and the determination of the effectiveness of the use of protective measures, taking into account the modeling of the processes of contamination of the working zones and special engineering solutions.

At the same time, the following scientific results were obtained:

First developed:

– a scientific and methodological toolkit for forecasting the formation of harmful factors in work zones and evaluating the effectiveness of the application of protective measures based on highly effective CFD models;

– the effectiveness of the use of screens of a special shape, located near the coal stack, in order to reduce the level of dust pollution of the working areas at industrial sites has been scientifically substantiated; to substantiate the parameters

of these screens, a method of calculating the concentration of dust in working areas has been developed, which takes into account the shape of the coal stack, the shape of the screen, and weather conditions;

– developed a comprehensive methodology for evaluating the effectiveness of wetting the surface of the coal pile and supplying water to the dust cloud near the pile, which are used to create normal working conditions at industrial sites;

– developed a comprehensive methodology for evaluating the effectiveness of the use of a water curtain, which is used to ensure labor protection requirements by shielding heat flows that occur during a fire; the methodology makes it possible to predict the decrease in air temperature near the source of the fire, taking into account the dynamics of the evaporation of water droplets, the location of the curtain, weather conditions, and the presence of buildings near the fire;

– a method was developed that allows conducting research on determining the effectiveness of the use of noise protection screens that are installed near the railway track; the method allows taking into account the complex geometric shape of the screens, their position relative to the noise source, the topography of the area;

– the effectiveness of the use of screens of a special form, located near highways in order to reduce the level of chemical pollution of work zones, has been scientifically substantiated; to substantiate the parameters of these screens, a toolkit was created, which is based on the use of developed numerical models and allows to determine the concentration of pollutants in the working zones, taking into account the shape of the screens, the relief, the position of the emission source, the chemical transformation of impurities, weather conditions;

– a multifactorial numerical model was developed to assess the risk of chemical or thermal damage to divers during repair work on damaged underwater pipelines. The model allows you to take into account the hydrodynamics of the water flow, the intensity of the emission of a chemically hazardous substance from the damaged underwater pipeline, the geometric shape of the underwater trench where the pipeline is located, and the temperature of the water near the damaged underwater pipeline;

received further development:

– an engineering method of calculating the process of "capture" of dust particles by a drop of water, which allows taking into account the dynamics of "attachment" of dust particles to the drop depending on the physical parameters of the drop, the concentration of dust particles and droplets, their movement in the air environment, which allows for a more correct assessment of efficiency dedusting the air in working areas;

– methodological principles of the technology for reducing the level of dust pollution in work zones due to the use of special boards and screens of a complex shape on wagons transporting coal; a method was developed for evaluating the effectiveness of using such means of reducing dust removal from wagons;

– a mathematical model for forecasting the intensity of pollution in work zones on industrial sites during inversion and calm, which makes it possible to quickly determine the concentration of pollutants taking into account the size of the source of emission of harmful substances, the wind speed profile, and the direction of the wind;

– a mathematical model for assessing dust pollution of the air in the middle of motor vehicles moving on the territory of the TPP; the model allows, unlike the existing ones, to quickly calculate the level of dust pollution of the air taking into account the aerodynamics of the air flow at workplaces in the car;

– a mathematical model for evaluating the efficiency of using suction devices (fans) to reduce the level of air pollution near highways; the model allows, in contrast to the existing models, to quickly take into account the different position of the suction surfaces, the influence of the car body on the aerodynamics of the air flow and the spread of impurities in the working zones;

improved:

– a mathematical model for rapid assessment of the risk of fire in storage due to self-heating of fuel of plant origin; the model allows you to quickly calculate the development of the thermal field in the fuel embankment, taking into account the shape of the embankment, the ambient temperature, and the thermophysical properties of the fuel;

– a method of calculating thermal air pollution in working premises when heated air flows into them and calculating the heating of building structures when

interacting with the flow of heated air, which allows taking into account the shape of buildings, weather conditions, the shape of the working room, thermophysical parameters of construction materials.

The practical significance of the results: the developed complex of mathematical models, methods and algorithms for their solution is the basis for substantiating organizational and technical measures aimed at reducing the negative impact of harmful factors on the enterprises of the fuel and energy complex of Ukraine in case of their occurrence during the functioning of objects or their detection at the stage project-research works aimed at improving methods of reducing negative factors on employees.

Using mathematical models and methods with software-implemented algorithms obtained in the work, it is possible to determine the maximum permissible values of factors related to the prevention of occupational diseases and injuries of workers and improvement of means and methods of worker protection.

So:

- on the basis of the created numerical models, packages of application programs (codes) were developed, which allow the method of computational experiments to determine the regularities of the formation of areas of chemical, dust and thermal pollution in the work zones at the facilities of the fuel and energy complex. They do not require significant time for development, installation, and are not expensive. For the practical use of methods of reducing the level of chemical and dust pollution of working areas, the use of special equipment is not required;

- conducting computational experiments on the basis of created numerical models allows reducing the role of expensive physical experiments in solving complex applied problems related to determining the level of danger to the health of workers under the influence of industrial sources of chemical, dust and thermal pollution;

- the proposed engineering method of dust control during the transportation of coal or when storing coal in stacks allows to effectively reduce the level of

contamination of working areas;

- the proposed engineering method of combating air pollution of work zones near highways allows to effectively reduce the level of chemical pollution of work zones;

- the proposed dynamic numerical model for evaluating the effectiveness of the water curtain allows in real time to determine the decrease in the intensity of heat flows that occur in the event of a fire and can be used to organize a scientifically based system for the protection of firefighters;

- constructed numerical models and computer programs were implemented in the State Emergency Situations Service of Ukraine in the Dnipropetrovsk Region (act of implementation).

In the first section of the dissertation, an analysis of harmful factors occurring at the facilities of the fuel and energy complex was carried out. Further, a critical analysis of literary sources on the problem under investigation was performed. It was found that numerical models (CFD models) are most actively used to assess the level of danger in work zones in the countries of the European Union and the United States, which allow obtaining more detailed information about the distribution of danger factors, and also, what is especially important, to perform an analysis of the effectiveness of various tools used in production to ensure normal working conditions. This makes it possible, already at the stage of the sketch design of protection systems, to determine whether this system allows to ensure normal working conditions, and if necessary, to make changes to the project at the initial stage in order to eliminate the identified shortcomings. This approach ensures the most rational use of resources when creating employee protection systems, reducing the share of physical (expensive) experimentation, guarantees the effective use of the protection system and directly affects the reduction of the project cost. At the same time, there is a shortage of such models in Ukraine, and simplified mathematical models and engineering methods are mainly used to solve the problems of assessing the level of danger in work zones. Such models practically do not allow to evaluate the effectiveness of the use of various means

used to ensure normal working conditions at factories. Therefore, there is an important task of developing multivariate numerical models.

The second section of the dissertation presents the results of scientific research on the creation of multifactorial numerical models, which make it possible to carry out an operational calculation to determine the regularities of the distribution of hazard factors in work zones near highways (chemical pollution), railway lines (noise pollution) and to determine the effectiveness of the use of protective barriers of special forms used to reduce the impact of hazard factors on the worker. This section shows that the use of protective barriers of a special form proposed in the thesis allows reducing the level of chemical pollution near highways. A numerical model was built, which allows to evaluate the effectiveness of the use of sorbent surfaces ("TX active surface") on the protective screen and on the walls of buildings to reduce the level of chemical contamination of working areas. An effective numerical model is proposed, which allows determining the effectiveness of the use of noise protection screens of a complex shape near the railway. This section presents the results of a complex of computational and physical experiments.

The third section of the dissertation provides the results of experimental research and a description of the constructed multifactorial numerical models for analyzing the effectiveness of using additional sides of a special shape and special screens on wagons with coal, which make it possible to reduce the level of dust pollution in the working areas near the transport highway.

The fourth section of the dissertation presents a multifactorial numerical model that allows to estimate the level of chemical or dust pollution of the air in the working zones at the industrial sites of the TPP in case of emissions in adverse weather conditions. Further in the section, the results of experimental studies and a description of the built multifactorial numerical models for the analysis of the effectiveness of the use of protective screens of various shapes, which are used to reduce the level of dust pollution of the working areas at the sites where the coal stacks are located, are given. The chapter presents a numerical model for

estimating the level of dust pollution in the middle of motor vehicles moving on the territory of the TPP. In particular, a new numerical model is presented that allows determining the effectiveness of coal stack humidification in order to reduce dust removal from the top of the stack. Also, this section presents a developed numerical model that allows determining the efficiency of water supply to the dust cloud formed near the coal stack.

The fifth section of the thesis describes the constructed multivariate numerical models for analyzing the risk of thermal and chemical damage to divers when working near damaged underwater pipelines.

The sixth section provides a description of the built multifactorial numerical models for analyzing the risk of thermal injury to workers during a fire, and determining the effectiveness of using a water curtain to reduce the risk of thermal injury to workers near the fire source.

Keywords: labour safety, workplace, chemical contamination, dust contamination, thermal contamination, workers thermal hitting, numerical methods, protection of workplaces from chemical and dust contamination, protective screens, water screen, dust suppression.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Біляєва В. В. Математичне моделювання теплового забруднення поверхневих вод. *Геотехнічна механіка*. 2012. Вип. 101. С. 295–301.

2. Беляева В. В. Математическое моделирование процесса самонагревания насыпи растительного сырья. *Вісник Дніпропетровського університету*. Серія «Механіка». 2014. № 5. Вип. 18, т. 1. С. 12–16.

3. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Беляева В. В., Берлов А. В. Локальная защита атмосферы от загрязнения. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2018. № 56. С. 223–231.

4. Biliaieva V. V., Kirichenko P. S., Berlov O. V., Gabrinets V. O., Horiachkin V. M. Computer modeling of air pollution in case of dust cloud movement in open pit mine. *Science and transport progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2019. № 4 (82). С. 18–25.

5. Biliaieva V. V., Kirichenko P. S., Gunko E. Y., Bondarenko I. O., Mashykhina P. B., Yakubovska Z. M. Computer simulation of dead-end mine working ventilation. *Science and transport progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2019. № 5 (83). С. 26–35.

6. Біляєв М. М., Берлов О. В., Калашніков І. В., Біляєва В. В. Моделювання затікання токсичного газу у приміщення. *Науковий вісник будівництва.* 2019. № 1 (95). С. 227–232.

7. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Чередниченко Л. А. Оцінка ризику термічного ураження у випадку аварійного горіння. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* 2020. № 6. С. 54–60.

8. Беликов А. С., Беляев Н. Н., Беляева В. В., Берлов А. В. Оценка уровня пылевого загрязнения рабочих зон методом математического моделирования. *Геотехнічна механіка.* 2020. № 152. С. 218–225.

9. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Калашніков І. В. Аварійне горіння твердого ракетного палива: оцінка ризику ураження людей в робочому приміщенні. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2020. Вип. 3 (87). С. 22–29.

10. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Вергун О. О. Моделювання роботи водяної завіси для захисту працівників від термічного ураження. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 2. С. 28–35.

11. Біляєва В. В. Використання математичних моделей для оцінювання рівня теплового та хімічного забруднення робочих зон. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 3. С. 39–45.

12. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А. Чисельне моделювання процесу самонагрівання насипу рослинної сировини з метою визначення часу початку пожежі. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 6. С. 7–13.

13. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Русакова Т. І. Чисельне моделювання забруднення повітря біля автошляху із захиснимі бар'єрами. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 2. С. 7–14.

14. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Краснюк А. В., Цуркан В. В. Чисельне моделювання забруднення повітря на промисловому майданчику під час штилю. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 4. С. 7–12.

15. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Kalashnikov I. Numerical simulation of toxic chemical transport after accidental release at chemical plant. *Romanian journal of information science and technology*. 2020. Vol. 23. N S. P. S3–S13 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Web of Science, квартиль Q3).*

16. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Application of local exhaust systems to reduce pollution concentration near the road. *Transport problems*. 2020. Vol. 15, issue 4, part 1. P. 137–148. DOI: 10.21307/tp-2020-055 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, квартиль Q3).*

17. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Computing model for simulation of the pollution dispersion near the road with solid barriers. *Transport problems*. 2021. Vol. 16, issue 2. P. 73–86. DOI: 10.21307/tp-2021-024 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, квартиль Q3).*

18. Biliaiev M., Kozachyna V, Biliaieva V., Rusakova T., Berlov O., Mala Y. Constructing a method for assessing the effectiveness of using protective barriers near highways to decrease the level of air pollution. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2021. № 6/10 (114). P. 30–39 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, квартиль Q3)*.

19. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Mathematical modeling of aeroion mode in a car. *Transport problems*. 2022. Vol. 17, issue 2. P. 19–32. DOI: 10.21307/tp-2020-055 (*видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, квартиль Q3*).

20. Біляєв М. М., Калашніков І. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Берлов О. В. Математичне моделювання в задачах оцінки ризику на потенційно небезпечних об’єктах: монографія. Дніпро: Журфонд, 2021. 270 с.

21. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD Моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях: монографія. Дніпро: Журфонд, 2022. 268 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

22. Беляева В. В., Якубовская З. Н. Оценка уровня загрязнения атмосферы при авариях. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист:* матеріали VII всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, 20–21 жовтня 2017 р. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. С. 118.

23. Беляев Н. Н., Беляева В. В., Берлов А. В., Гунько Е. Ю., Козачина В.А. Математическое моделирование аварийных ситуаций на химически опасных объектах. *Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України:* матеріали V всеукр. наук.-практ. конф., 30 квітня 2019 р. Київ: НПУ імені М. П. Драгоманова, 2019. С. 20–21.

24. Беляева В. В., Долина Л. Ф., Заика А. А., Дорога О. Г. Математическое моделирование загрязнения атмосферы промышленными выбросами. *Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем:*

матеріали IV міжнар. наук.-техн. конф., 1–2 листопада 2018 р. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2018. С. 39.

25. Беляева В. В., Берлов А. В., Гунько Е. Ю. Компьютерное моделирование загрязнения воздушной среды в рабочих зонах. *Комп'терне моделювання та оптимізація складних систем:* VI міжнар. наук.-техн. конф., 4-6 листопада 2020 р. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2020. С. 21–22.

26. Біляєв М. М., Берлов О. В., Оладіпо М. О., Біляєва В. В., Чередніченко Л. А. Ризик-орієнтовані моделі для рішення задач прогнозування ураження людей при виникненні надзвичайних ситуацій. *Безпека життєдіяльності в XXI столітті:* VIII міжнар. наук.-практ. конф., 19-20 листопада 2020 р. Дніпро, 2020. С. 19–20.

27. Беляева В. В., Берлов А. В., Машихина П. Б. CFD моделирование в прикладних задачах. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур:* IX всеукр. наук. семінар, 20-21 жовтня 2020 р. Харків: ХНУБА, 2020. С. 17–18.

28. Беляева В. В., Патенко А., Берлов А. В. Компьютерное моделирование чрезвычайних ситуаций на транспорте и опасных производствах. *Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіти*: тези XIV міжнар. наук.-практ. конф., 15-16 грудня 2020 р. Дніпро: ДІІТ, 2020. С. 166–167.

29. Беляева В. В., Новоселец И. С., Берлов А. В. Оценка загрязнения воздушной среды методом компьютерного моделирования. *Priority Directions of Science and Technology Development: abstracts of III internat. scient. and pract. conf.*, November 22-24, 2020. Kyiv, 2020. P. 307–308.

30. Беляева В. В., Берлов А. В., Вовк В. В., Горбунов Ю. А., Горохов А. И. Моделирование экстремальных ситуаций на транспорте. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств:* тези 9-ї міжнар. наук.-практ. конф., 26-27 листопада 2020 р. Дніпро: ДНУЗТ, 2020. С. 13–14.

31. Біляєва В. В., Берлов О. В. Пакет програм «WORK-SAFE2» для моделювання забруднення робочих зон при екстремальних ситуаціях. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи*: матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф., 26 березня 2021 р. Львів: ЛДУБЖД, 2021. С. 5–6.

32. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В. Математичне моделювання наслідків нестаціонарних викидів. *Теоретико-практичні проблеми використання математичних методів і комп'ютерно-орієнтованих технологій в освіті та науці*: зб. матеріалів III всеукр. конф., 28 квітня 2021 р. Київ: ун-т ім. Б. Грінченка, 2021. С. 149–150.

33. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В. Математичне моделювання наслідків екстремальних ситуацій на промислових об'єктах. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні*: міжнар. наук.-техн. конф., 16-18 березня 2021 р. Дніпро, 2021. С. 107–109.

34. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Якубовська З. М. Комп'ютерне моделювання в задачах оцінювання наслідків екстремальних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*: VII міжнар. наук.-техн. конф., 3-5 листопада 2021 р. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2021. С. 15–16.

35. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Якубовська З. М. Оцінювання наслідків екстремальних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах методом математичного моделювання. *Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах*: матеріали всеукр. наук.-практ. інтернет-конф., 2-3 листопада 2021 р. Харків: ХНАДУ, 2021. С. 195–197.

36. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Козачина В. А. Чисельні моделі для експрес оцінювання ризику ураження при аварійних ситуаціях. *Trends and Prospects Development of Science and Practice in Modern Environment:* abstracts of X internat. science conf., November 22–24, 2021. Geneva, 2021. P. 326–327.

37. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Русакова Т. І. Екстремальні ситуації на транспорті – моделі для оцінювання ризику ураження персоналу. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств*: матеріали 10-ї міжнар. наук.-практ. конф., 25-26 листопада 2021 р. Дніпро: ДНУЗТ, 2021. С. 16–17.

38. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Вергун О. О., Якубовська З. М. Компьютерне моделювання та пакети програм для експрес оцінювання наслідків аварійних ситуацій. *Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіти:* тези XV міжнар. наук.-практ. конф., 16–17 грудня 2021 р. Дніпро: ДІІТ, 2021. С. 57.

39. Біляєва В. В., Машихіна П. Б., Гунько О. Ю. Чисельне моделювання в задачах охорони праці та екологічної безпеки. *Modern Challenges to Science and Practice:* abstracts of III internat. scientific and pract. conf., january 24–26, 2022. Varna, Bulgaria, 2022. P. 553–554.

40. Біляєва В. В., Гунько О. Ю., Машихіна П. Б. Оцінювання ризику ураження персоналу та забруднення навколишнього середовища методом математичного моделювання. *Actual Problems of Practice and Science and Methods of its Solution*: abstracts of IV internat. science conf., january 31 – february 02, 2022. Milan, Italy, 2022. P. 626.

41. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Русакова Т. І, Берлов О. В., Козачина В. А. Використання математичних моделей в задачах оцінювання наслідків екстремальних ситуацій на промислових об’єктах. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні*: тези доп. XIII міжнар. наук.-техн. конф., 18 травня 2022 р. Дніпро: НМетАУ, 2022. С. 99–100.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

42. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Калашніков І. В. Математичне моделювання затікання токсичного газу у приміщення при

аварії на промисловому майданчику. *Математичне моделювання*. 2018. № 2 (39). С. 95–101.

43. Biliaiev M., Kozhachyna V, Biliaieva V., Mutiu Olatoye Oladipo, Chernyatyeva K. Modeling of the atmosphere pollution from coal trains. MATEC Web of Conferences 294, 02007 (2019), EOT-2019. https://doi.org/10.1051/matecconf/201929402007 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Web of Science).*

44. Biliaiev M. M., Biliaieva V. V., Kozachyna V. A., Berlov O. V., Oladipo M. O., Kirichenko P. S. Reducing of coal dust release from train wagon with barrier. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 985 (2020) 012018, p. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/985/1/012018 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).*

45. Biliaiev M., Biliaieva V., Berlov O., Kozachyna V., Kirichenko P., Oladipo M.O., Poltoratska V. Modeling coal dust dispersion from pile with protection barriers. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 168. P. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202016800021 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Web of Science)*.

46. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Oladipo M. Road with fan for reducing exposure to traffic emissions. Proceedings of 25th International Scientific Conference. Transport Means 2021, October 6-8, Part II, Kaunas, Lithuania, p. 638–643 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).*

47. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Gunko O., Rusakova T. Numerical model for evaluation efficiency of coal pile wetting. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 970 (012037). DOI: 10.1088/1755-1315/970/1/012037 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).*

ЗМІСТ

ВСТУП 25
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ 37
1.1 Правові аспекти охорони праці в державі 37
1.3 Методи оцінювання шкідливих факторів у робочих зонах біля транспортних магістралей 41
1.4 Захист від пилового забруднення робочих зон біля залізниць 48
1.5 Захист робочих зон від пилового забруднення на об'єктах паливно-енергетичного комплексу 51
1.6 Методи оцінювання рівня пожежного ризику 56
1.7 Постановка завдань дослідження 60
Висновки до розділу 1 61
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БАР'ЄРІВ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ВПЛИВУ ШКІДЛИВИХ ФАКТОРІВ НА ПРАЦІВНИКІВ 63
2.1 Використання бар'єрів з додатковими елементами для зниження рівня хімічного забруднення в робочих зонах 63
2.2 Дослідження ефективності використання вентилятора для зниження рівня хімічного забруднення робочих зон 113
2.3 Тестування чисельних моделей 128
2.4 Використання захисних бар'єрів з «TX Active» поверхнею для зниження рівня хімічного забруднення в робочих зонах 131
2.5 Використання «TX Active» поверхні на будівлях для зниження рівня хімічного забруднення в робочих зонах 148
2.6 Оцінка ефективності використання бар'єрів для зниження шумового забруднення в робочих зонах 159
Висновки до розділу 2 173
РОЗДІЛ 3 ЗАХИСТ РОБОЧИХ ЗОН ВІД ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПІД ЧАС ВИНОСУ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ З НАПІВВАГОНІВ 175
3.1 Опис експериментальної установки 175
3.2 Дослідження ефективності застосування додаткових бортів з двома «крилами» для захисту робочих зон від забруднення 178
3.3 Дослідження ефективності застосування екрана з додатковим елементом для захисту робочих зон від забруднення 189
Висновки до розділу 3 205

РОЗДІЛ 4 ОЦІНЮВАННЯ ШКІДЛИВИХ ФАКТОРІВ ТА ЗАХИСТ РОБОЧИХ ЗОН ВІД ЗАБРУДНЕННЯ НА ТЕРИТОРІЇ ТЕС 206
4.1 Оцінювання рівня забруднення повітря на промисловому майданчику ТЕС за несприятливих метеоумов 206
4.2 Оцінювання рівня пилового забруднення повітря в салоні авто, що рухається територією ТЕС 219
4.3 Захист робочих зон від пилового забруднення біля вугільного штабеля шляхом використання бар'єрів 227
4.5 Зменшення рівня пилового забруднення робочих зон шляхом подавання води в пилову хмару 265
Висновки до розділу 4 280
РОЗДІЛ 5 ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ХІМІЧНОГО ТА ТЕРМІЧНОГО УРАЖЕННЯ ПРАЦІВНИКІВ ПІД ЧАС ПІДВОДНИХ РОБІТ 283
5.1 Оцінювання ризику ураження водолаза, що працює в зоні теплового або хімічного забруднення річки 283
Висновки до розділу 5 298
РОЗДІЛ 6 ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖІ В СХОВИЩАХ ПАЛИВА ТА ТЕРМІЧНОГО УРАЖЕННЯ ПРАЦІВНИКІВ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖІ 300
6.1. Оцінювання ризику термічного ураження в разі займання цистерни з паливом 300
6.2. Оцінювання ризику термічного ураження працівників у разі пожежі в умовах забудови 312
6.3 Моделювання роботи водяної завіси, що використовується для захисту працівників від термічного ураження 338
6.4 Моделювання процесу самонагрівання насипу палива в сховищі 350
Висновки до розділу 6 358
ВИСНОВКИ 360
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 365
ДОДАТОК А ВІДОМОСТІ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ 388
ДОДАТОК Б СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ 390

ВСТУП

Сутність науково-прикладної проблеми, що розглядається в роботі, полягає в розробленні інструментарію оцінювання рівня небезпеки в робочих зонах на території об’єктів паливно-енергетичного комплексу та визначення ефективності зниження рівня хімічного і пилового забруднення повітря шляхом моделювання процесів та використання спеціальних інженерних рішень.

Актуальність теми. Згідно з Концепцією реформування системи управління охороною праці в Україні, схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2018 р. № 989-р, актуальною проблемою в галузі охорони праці є забезпечення механізму формування та функціонування дієвої системи запобігання виробничим ризикам, створення безпечних і здорових умов праці. У цьому документі також наголошується на важливості оцінювання ризиків, яких не можна уникнути. Для вирішення цієї важливої проблеми, особливо на етапі розроблення систем захисту працівників від впливу шкідливих факторів, потрібно отримати адекватну інформацію щодо рівня небезпеки в робочих зонах.

Паливно-енергетичний комплекс України належить до стратегічних та потенційно небезпечних об’єктів. Під час функціонування різних об’єктів цього комплексу, у ході транспортування палива, його зберігання відбувається виникнення шкідливих факторів у робочих зонах, що призводить до появи професійних захворювань у працівників та не відповідає вимогам законодавства з охорони праці. Тому оцінювання шкідливих факторів і захист працівників на об’єктах паливно-енергетичного комплексу є важливою науковою проблемою. Для її розв’язання необхідно запропонувати сучасні високоефективні методи визначення рівня небезпеки в робочих зонах, що дозволяють одночасно вирішувати задачі з визначення

ефективності використання різних засобів зниження впливу небезпечних факторів на працівників.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконувалося згідно із Законом України «Про затвердження Загальнодержавної соціальної програми поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2014-2018 роки» від 04 квітня 2013 року № 178-VII, розпорядженням Кабінету Міністрів України «Про схвалення Концепції реформування системи управління охороною праці в Україні та затвердження плану заходів щодо її реалізації» від 12 грудня 2018 р. № 989-р.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертації є розроблення теоретичного інструментарію для встановлення закономірностей розподілу шкідливих факторів у робочих зонах на об'єктах паливно-енергетичного комплексу та розроблення засобів, що дозволяють зменшити їх негативний вплив.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити такі завдання дослідження:

– виконати аналіз та дослідження основних шкідливих факторів, які наявні при функціонуванні паливно-енергетичного комплексу (на прикладі Придніпровської теплової електростанції);

– здійснити моделювання процесів хімічного, пилового, термічного та шумового забруднення робочих зон на об'єктах паливно-енергетичного комплексу і розробити інструментарій, який включає цілу низку чисельних моделей;

– розробити чисельні моделі для визначення закономірностей формування областей забруднення в робочих зонах на промислових майданчиках підприємств при інверсії та штилі, що дозволяють швидко виявляти зони небезпеки, які формуються за несприятливих метеоумов;

– розробити багатопараметричну чисельну модель для оцінювання пилового забруднення повітря всередині автотранспорту, що рухається забрудненою територією теплової електростанції (ТЕС);

– розробити динамічні чисельні моделі для оцінювання ефективності знепилення повітря в робочих зонах біля штабеля вугілля шляхом подавання води в пилову хмару або шляхом зволоження поверхні штабелів вугілля, що розташовані на об’єктах паливно-енергетичного комплексу;

– розробити інженерний метод розрахунку процесу «захоплення» краплею води часток пилу при поширенні крапель води в пиловій хмарі, що дозволяє здійснювати оцінювання ефективності такого роду знепилення повітря в робочих зонах;

– розробити динамічні чисельні моделі для оцінювання ефективності комплексного використання вентиляторів із бар’єрами та екранами для зниження рівня забруднення повітря в робочих зонах;

– на базі розроблених чисельних моделей виконати дослідження з визначення ефективності використання бар’єрів складної геометричної форми, а також бар’єрів, що мають «ТХ Active» поверхню та розташовуються поруч із автомобільними дорогами, з метою зменшення рівня забруднення повітря в робочих зонах;

– здійснити експериментальні дослідження з визначення ефективності використання на вагонах, якими здійснюють транспортування вугілля, спеціальних бортів та екранів із метою зниження рівня пилового забруднення робочих зон біля колії; створити чисельні моделі для визначення ефективності цих засобів захисту шляхом обчислювального експерименту;

– виконати експериментальні дослідження з визначення впливу екранів спеціальної форми на зниження рівня пилового забруднення робочих зон біля штабеля вугілля та розробити багатофакторну чисельну модель для визначення ефективності використання цих екранів для конкретних умов експлуатації;

– розробити чисельну модель для оцінювання ефективності використання шумозахисних екранів для залізничної мережі підприємств, що дозволяє врахувати складну геометричну форму екранів, рельєф місцевості;

– розробити динамічну багатопараметричну чисельну модель для оперативного оцінювання ризику виникнення пожежі в сховищах палива, що має рослинне походження, та динамічну чисельну модель для оцінювання ефективності водяної завіси, що дозволяє комплексно врахувати вплив вітру, дифузії, швидкість випарювання крапель води, наявність будівель у зоні пожежі на об’єктах паливно-енергетичного комплексу;

– розробити метод розв’язання двох пов’язаних задач: визначення закономірностей формування зон теплового забруднення повітря в робочих приміщеннях при припливі в них зовнішнього нагрітого повітря від місця пожежі та розрахунку нагрівання конструкцій споруд при їх взаємодії з потоком нагрітого повітря, що дозволяє прогнозувати час руйнування конструкції;

– розробити багатофакторну чисельну модель для оцінювання ризику термічного або хімічного ураження водолазів під час виконання аварійно-ремонтних робіт на пошкоджених підводних трубопроводах;

– здійснити верифікацію розроблених чисельних моделей;

– створити комп’ютерні коди на базі розроблених чисельних моделей та виконати обчислювальні експерименти.

Об’єкт дослідження: процеси формування забруднення в робочих зонах при роботі об’єктів паливно-енергетичного комплексу.

Предмет дослідження: встановлення закономірностей розподілу шкідливих факторів у робочих зонах та розроблення інженерних методів зниження їх негативного впливу на працівників.

Методи дослідження: системний аналіз та узагальнення відомих наукових результатів (для обґрунтування актуальності теми дослідження, постановки мети і завдань дослідження; для формування передумов, обмежень і гіпотез, прийнятих при розробленні методу); виконання

експериментальних досліджень; використання методу CFD-моделювання на базі побудованих чисельних моделей, що дозволяють дослідити багатофакторні процеси хімічного, пилового та теплового забруднення робочих зон. Основу побудованих чисельних моделей створюють фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища та тепломасопереносу. Для побудови чисельних моделей використовувалися скінченно-різницеві методи інтегрування моделюючих рівнянь.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в обґрунтуванні оцінки рівня небезпеки в робочих зонах на території об'єктів паливно-енергетичного комплексу та визначенні ефективності застосування засобів захисту з урахуванням моделювання процесів забруднення робочих зон та спеціальних інженерних рішень, а саме:

вперше:

– розроблено науково-методичний інструментарій прогнозування формування шкідливих факторів у робочих зонах та оцінювання ефективності впровадження заходів захисту на базі високоефективних CFD-моделей;

– науково обґрунтовано ефективність використання екранів спеціальної форми, які розташовують біля штабеля вугілля з метою зниження рівня пилового забруднення робочих зон на промислових майданчиках; для обґрунтування параметрів цих екранів розроблено метод розрахунку концентрації пилу в робочих зонах, який враховує форму штабеля вугілля, форму екрану, метеоумови;

– розроблено комплексну методологію оцінювання ефективності зволоження поверхні штабеля вугілля та подавання води в пилову хмару біля штабеля, що здійснюються для створення нормальних умов праці на промислових майданчиках;

– розроблено комплексну методологію оцінювання ефективності використання водяної завіси, що застосовується для забезпечення вимог охорони праці шляхом екранування теплових потоків, які виникають під час

пожежі; методологія дозволяє прогнозувати зниження температури повітря біля джерела пожежі з урахуванням динаміки випарювання крапель води, місця створення завіси, метеоумов, наявності будівель біля місця пожежі;

– розроблено метод, що дозволяє виконувати дослідження щодо визначення ефективності використання шумозахисних екранів, які встановлюють біля залізничної колії; метод дозволяє враховувати складну геометричну форму екранів, їхнє положення відносно джерела шуму, рельєф місцевості;

– науково обґрунтовано ефективність використання бар'єрів спеціальної форми, які розташовують біля автомагістралей з метою зниження рівня хімічного забруднення робочих зон; для обґрунтування параметрів цих бар'єрів створено інструментарій, що базується на використанні розроблених чисельних моделей та дозволяє визначати концентрацію забруднюючих речовин у робочих зонах з урахуванням форми бар'єрів, рельєфу, положення джерела емісії, хімічної трансформації домішок, метеоумов;

– розроблено багатофакторну чисельну модель для оцінювання ризику хімічного або термічного ураження водолазів під час виконання ремонтних робіт на пошкоджених підводних трубопроводах; модель дозволяє враховувати гідродинаміку течії водного потоку, інтенсивність емісії хімічно небезпечної речовини з пошкодженого підводного трубопроводу, геометричну форму підводної траншеї, де розташовано трубопровід, температуру води біля пошкодженого підводного трубопроводу;

дістали подальший розвиток:

– інженерний метод розрахунку процесу «захоплення» краплею води часток пилу, що дозволяє врахувати динаміку «приєднання» часток пилу до краплі залежно від фізичних параметрів краплі, концентрації часток пилу та крапель, їх руху в повітряному середовищі й здійснити більш коректну оцінку ефективності знепилення повітря в робочих зонах;

– методологічні засади технології зниження рівня пилового забруднення в робочих зонах за рахунок застосування спеціальних бортів та

екранів складної форми на вагонах, що транспортують вугілля; розроблено метод для оцінювання ефективності використання таких засобів зменшення виносу пилу з вагонів;

– математична модель прогнозування інтенсивності забруднення в робочих зонах промислових майданчиків при інверсії та штилі, що дає можливість оперативно визначити концентрації забруднюючих речовин з урахуванням розміру джерела емісії шкідливих речовин, профілю швидкості вітру, напряму вітру;

– математична модель для оцінювання пилового забруднення повітря всередині автотранспорту, що рухається територією ТЕС; модель дозволяє, на відміну від існуючих, швидко здійснити розрахунок рівня пилового забруднення повітря з урахуванням аеродинаміки повітряного потоку на робочих місцях у автотранспорті;

– математична модель оцінювання ефективності використання всмоктувальних пристроїв (вентиляторів) для зниження рівня забруднення повітря біля автотрас; модель дозволяє, на відміну від існуючих, швидко враховувати різне положення всмоктувальних поверхонь, вплив корпусу автотранспорту на аеродинаміку повітряного потоку та поширення домішки в робочих зонах;

удосконалено:

– математичну модель для експрес-оцінювання ризику виникнення пожежі в сховищах унаслідок самонагрівання палива, що має рослинне походження; модель дозволяє швидко розрахувати розвиток теплового поля в насипу палива з урахуванням форми насипу, температури навколишнього середовища, теплофізичних властивостей палива;

– метод розрахунку теплового забруднення повітря в робочих приміщеннях при припливі в них нагрітого повітря та розрахунку нагрівання конструкцій споруд при взаємодії з потоком нагрітого повітря, що дозволяє врахувати форму споруд, метеоумови, форму робочого приміщення, теплофізичні параметри матеріалів конструкції.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблений комплекс математичних моделей, методів та алгоритмів є підставою для обґрунтування організаційно-технічних заходів, які спрямовані на зниження негативного впливу шкідливих факторів на підприємствах паливно-енергетичного комплексу України в разі їх виникнення під час функціонування об’єктів або виявлення на стадії проєктно-дослідницьких робіт, що спрямовані на вдосконалення методів зниження негативних факторів на працівників.

Використовуючи отримані в роботі математичні моделі та методи з програмно-реалізованими алгоритмами, можна визначити гранично допустимі значення чинників для запобігання виникненню професійних захворювань та травмуванню працівників і вдосконалити засоби та методи захисту працівників, а саме:

– на базі створених чисельних моделей розроблено пакети прикладних програм (коди), що дозволяють методом обчислювального експерименту визначати закономірності формування областей хімічного, пилового та теплового забруднення в робочих зонах на об’єктах паливно-енергетичного комплексу. Вони не вимагають значного часу на розробку, установку, мають помірну вартість. Для практичного використання методів зниження рівня хімічного та пилового забруднення робочих зон не потрібно застосовувати спеціальне обладнання;

– виконання обчислювальних експериментів на базі створених чисельних моделей дозволяє зменшити роль дорогого фізичного експерименту при розв’язанні складних прикладних задач, що пов’язані з визначенням рівня небезпеки для здоров’я працівників при дії промислових джерел хімічного, пилового та теплового забруднення;

– запропонований інженерний метод боротьби з пилом під час перевезення вугілля або його зберігання в штабелях дозволяє ефективно зменшити рівень забруднення робочих зон;

– запропонований інженерний метод боротьби із забрудненням повітря робочих зон біля автотрас дозволяє ефективно зменшити рівень хімічного

забруднення робочих зон;

– запропонована динамічна чисельна модель для оцінювання ефективності водяної завіси дозволяє в режимі реального часу визначити зниження інтенсивності теплових потоків, що виникають у випадку пожежі та може бути використана для організації науково обґрунтованої системи захисту пожежників;

– розроблені чисельні моделі та створене на їх базі програмне забезпечення впроваджені в Головному управлінні Державної служби України з надзвичайних ситуацій в Дніпропетровській області (ДСНС України) для оцінювання рівня небезпеки в робочих зонах, а також в освітньому процесі Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури».

Особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих у співавторстві, полягає в:

– аналізі стану проблеми [27, 38];

– розробленні чисельних моделей аеродинаміки для розрахунку поля швидкості повітря в робочих зонах, що мають складну геометричну форму; розробленні комп'ютерних кодів; проведенні обчислювального експерименту для визначення поля швидкості в робочих зонах [12, 24, 25, 27, 37, 133, 134];

– аналізі стану проблеми; розробленні чисельної моделі для розв'язання задачі аеродинаміки на базі неявної схеми розщеплення; розробленні комп'ютерного коду; проведенні обчислювального експерименту для визначення поля швидкості в робочих зонах [128];

– програмуванні розроблених чисельних моделей для розв'язання задач аеродинаміки; проведенні обчислювальних експериментів [124];

– аналізі стану проблеми; розробленні чисельних моделей для розв'язання задач масопереносу; розробленні комп'ютерних кодів; проведенні обчислювальних та фізичних експериментів; аналізі та обробленні даних досліджень [10, 13, 17, 18, 29, 38–41, 43, 47, 127, 129, 130–132];

– розробленні конструкції спеціальних додаткових бортів; проведенні експериментів по моделюванню пилового забруднення робочих зон; аналізі та обробленні даних експериментальних досліджень; розробленні чисельних моделей масопереносу при емісії пилу; створенні комп'ютерних кодів; проведенні обчислювальних експериментів; обробленні даних обчислювальних експериментів [38, 122, 123, 125];

– розробленні концепції використання захисних бар'єрів, екранів складної форми для мінімізації рівня забруднення робочих зон; проведенні експериментальних досліджень; розробленні чисельних моделей для аналізу ефективності використання бар'єрів, екранів; обробленні результатів досліджень [35, 38, 43, 47, 48];

– розробленні чисельної моделі для аналізу шумового забруднення робочих зон; створенні комп'ютерного коду; проведенні досліджень на базі розробленої моделі; аналізі та обробленні даних досліджень [38, 48];

– розробленні чисельних моделей для розв'язання задач теплопереносу; моделюванні роботи водяної завіси; моделюванні ризику термічного ураження працівників, ризику займання в сховищах; розробленні комп'ютерних кодів; проведенні обчислювальних експериментів; аналізі та обробленні даних досліджень [19–23, 26, 32–36, 38, 41, 42];

– аналізі стану проблеми; розробленні чисельних моделей для оцінювання ризику ураження водолаза; розробленні комп'ютерних кодів; проведенні обчислювальних експериментів; аналізі та обробленні даних досліджень [30, 31, 35, 38, 43, 46].

Апробація матеріалів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались і одержали позитивні оцінки на наукових конференціях і семінарах: VII Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2017 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (м. Дніпро, 2018 р.); V Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми цивільного

захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України» (м. Київ, 2019 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport» (м. Львів, 2019 р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (м. Дніпро, 2020 р.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека життєдіяльності в XXI столітті» (м. Дніпро, 2020 р.); 2nd International Conference «Mining Science and Practice» (м. Дніпро, 2020 р.); IX Всеукраїнському науковому семінарі «Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур» (м. Харків, 2020 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, промисловості та освіти» (м. Дніпро, 2020 р.); науковій конференції «Priority Directions of Science and Technology Development» (м. Київ, 2020 р.); 9 Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств» (м. Дніпро, 2020 р.); XII Міжнародній науковій конференції «Transport Problems 2020» (Польща, 2020 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи» (м. Львів, 2021 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (м. Дніпро, 2021 р.); III Всеукраїнській конференції «Теоретико-практичні проблеми використання математичних методів і комп'ютерно-орієнтованих технологій в освіті та науці» (м Київ, 2021 р.); III Міжнародній конференції «Essays of mining science and practice» (м. Дніпро, 2021 р.); 25 Міжнародній науковій конференції «Transport means 2021» (Kaunas, Litva, 2021 р.); X International scienific and practical conference «Trends and prospects development of science and practice in modern environment» (Geneva, Switzerland, 2021 р.); III International scientific and practical conference «Modern challenges to science and practice» (Varna, Bulgaria, 2022 р.); IV International science conference «Actual problems of practice and science and methods of its solution» (Milan, Italy, 2022 р.).

Публікації. Основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи відображено в 47 наукових публікаціях, а саме: 47 публікаціях, а саме: 15 статтях у наукових фахових виданнях України (з них 1 – у виданні, включеному до міжнародної наукометричної бази Scopus), 4 статтях у зарубіжних наукових періодичних виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science; 2 монографіях; 20 тезах доповідей; 6 працях, які додатково відображають наукові результати дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і 2 додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи – 397 сторінок, у тому числі обсяг основного тексту – 329 сторінок (13,7 авторських аркушів). Дисертація містить 34 таблиці, 202 рисунки. Список використаних джерел включає 197 найменувань на 23 сторінках. Додатки викладено на 10 сторінках.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ

У розділі виконано критичний огляд наукових джерел, що присвячені проблемі визначення шкідливих факторів та методів їх оцінювання при функціонуванні об’єктів паливно-енергетичного комплексу.

1.1 Правові аспекти охорони праці в державі

Питанням охорони праці в Україні завжди приділялася значна увага [1, 6, 9, 51, 52, 56, 58, 64, 67, 68, 70, 72, 73, 75, 81, 91–93, 96, 104, 105, 110, 137, 184]. Безпека життєдіяльності людини має гарантії в Конституції. Для реалізації цього конституційного права в Україні розроблена та впроваджена велика нормативно-правова база, що є основою для правового та практичного забезпечення охорони праці. Насамперед потрібно назвати Закон України «Про охорону праці», Кодекс законів України про працю. У країні розроблено комплекс важливих документів, що стосуються проблеми охорони праці в різних галузях, зокрема під час функціонування об’єктів паливно-енергетичного комплексу:

1. Розпорядження КМУ від 24.07.2013 № 1071 «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 р.».

2. ДСТУ 18001:2015, що регламентує систему управління гігієною та безпекою праці.

3. ДБН А.3.2-2-2009 стосовно системи стандартів безпеки праці.

4. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2018 р. № 989-р, де запропонована Концепція, що «визначає основні напрями та завдання створення системи організації безпеки та гігієни праці в Україні на основі ризикоорієнтованого підходу для забезпечення впровадження стандартів Європейського Союзу».

6. НАПБ А.01.001-2014 (із змінами) Правила пожежної безпеки в Україні.

7. ДСТУ 3273-95 Безпечність промислових підприємств. Загальні положення та вимоги.

8. НПАОП 40.3-1.16-93 Правила вибухопожежобезпеки паливоподач електростанцій.

На практиці для положень, сформульованих у правових документах, також потрібно мати інструментарій, який дає можливість на етапі проєктування, реконструкції промислових об'єктів, що належать до паливно-енергетичного комплексу, заздалегідь визначати шкідливі фактори, їхній рівень та можливий ризик здоров'ю на різних робочих місцях. Важливе значення має створення теоретичного інструментарію з оцінки ефективності засобів, що спрямовані на мінімізацію дії шкідливих факторів у робочих зонах. За допомогою цього інструментарію з'являється можливість «передбачати» ризик ураження працівників, появу небезпечних факторів у робочих зонах та розробити вже на етапі проєктування науково обґрунтовані засоби захисту людини від ураження. Також необхідно наголосити, що в існуючій нормативній базі практично відсутні методи оцінювання ризику ураження працівників, які працюють на відкритій місцевості – на промислових майданчиках за несприятливих метеоумов. Тому важливою науковою проблемою є створення теоретичного інструментарію, що дозволяє науково обґрунтовано визначати якість навколишнього середовища в робочих зонах різноманітних об'єктів паливно-енергетичного комплексу.

1.2 Аналіз шкідливих факторів, що наявні при функціонуванні об'єктів паливно-енергетичного комплексу

Відомо, що паливно-енергетичний комплекс – це сукупність різних підприємств, технологічних процесів, матеріального устаткування для

забезпечення країни паливом та електроенергією. До складу цього комплексу входять об’єкти, що забезпечують видобуток, переробку, транспортування, зберігання різних ресурсів: нафтових, вугільних, торфових та інших.

У ході функціонування об’єктів паливно-енергетичного комплексу на різних ділянках підприємства та при різних технологічних процесах виникають шкідливі фактори. Найбільш поширені шкідливі фактори, які виникають на території теплової електростанції (ТЕС), показані на рис. 1.1.

Рисунок 1.1 – Шкідливі фактори, що виникають на різних об’єктах паливно-енергетичного комплексу

Шляхом системного аналізу існуючих джерел інформації встановлені такі шкідливі фактори, які виникають на підприємствах паливно-енергетичного комплексу (на прикладі Придніпровської ТЕС):

1. Пилове забруднення повітря робочих зон на території підприємства в результаті транспортування вугілля залізничним транспортом (негативний вплив на працівників: ризик виникнення хвороб органів дихання, хронічних хвороб носоглотки, алергічних реакцій, запальних процесів та роздратування слизової оболонки очей, скорочення життя);

2. Шумове забруднення робочих зон від залізничного транспорту або від автотранспорту на території об’єктів (негативний вплив на працівників: ризик виникнення хвороб органів слуху, руйнування нервової системи, головні болі, порушення сну);

3. Хімічне забруднення повітря робочих зон у результаті викиду продуктів горіння від маневрових тепловозів, вантажних автомобілів, що працюють на об’єкті, організовані викиди з труб (негативний вплив на працівників: порушення нормальної роботи органів дихання, запальні процеси носоглотки та очей, ураження шкіри, біль у горлі, кашель, хрипота, запаморочення, зниження імунітету);

4. Пилове забруднення робочих зон у результаті виносу вугільного пилу від штабелів вугілля, що розташовані на підприємстві (негативний вплив на працівників: підвищений ризик виникнення хвороб органів дихання, хронічних хвороб носоглотки, алергічних реакцій, запальних процесів та подразнення слизової оболонки очей);

5. Теплове забруднення робочих зон у результаті роботи теплоагрегатів (негативний вплив на працівників: ризик виникнення хвороб органів дихання та серцево-судинної системи, подразнення слизової оболонки очей, порушення роботи нервової системи, пошкодження шкіри, слабкість);

6. Електромагнітне забруднення робочих зон у результаті роботи електроагрегатів (негативний вплив на працівників: порушення роботи нервової системи, погіршення пам’яті, депресія, порушення сну, запаморочення, слабкість);

7. Хімічне та теплове забруднення робочих зон у разі екстремальних ситуацій на об’єкті: пожежі, розлив хімічно небезпечних речовин тощо (негативний вплив на працівників: ризик тяжкого ураження працівників, летальний кінець);

8. Хімічне та пилове забруднення робочих зон на промисловому майданчику ТЕС у результаті викидів з промислових труб, від сховищ вугілля, що спостерігаються за несприятливих метеоумов (інверсія, штиль).

Врахування такого широкого спектру шкідливих факторів при оцінюванні їх впливу на працівників є важливою науковою проблемою та вимагає розробки ефективних методів аналізу, прогнозу формування областей небезпеки в робочих зонах та засобів зниження негативного впливу шкідливих факторів на працівників.

1.3 Методи оцінювання шкідливих факторів у робочих зонах біля транспортних магістралей

Транспортування вугілля, нафтопродуктів, газу тощо до об'єктів паливно-енергетичного комплексу найчастіше здійснюється залізничним або автодорожнім транспортом. Як відомо, біля транспортних магістралей (автотраси, залізнична колія тощо) розташована значна кількість робочих зон, де працюють співробітники як транспортних служб, так і інших організацій. Ці робочі зони потрапляють під негативний вплив транспортних магістралей, насамперед спостерігається хімічне, пилове та шумове забруднення [162, 191]. Тому виникає важлива проблема захисту робочих зон, що розташовані поблизу транспортних шляхів, від забруднення.

Одним із шляхів вирішення проблеми мінімізації забруднення робочих зон біля автодоріг є реінжиніринг мережі магістралей [155, 165, 171]. Іншим підходом є установка на вихлопній системі спеціальних пристроїв, що забезпечують «захоплення», нейтралізацію токсичних компонентів, які містяться у вихлопах [141, 180].

Наголосимо, що для розробки систем захисту робочих зон від хімічного або шумового забруднення насамперед потрібно визначити рівень цього забруднення. Одним з методів розв'язання цієї задачі є використання експериментального підходу [164, 195]. Розв'язання цієї задачі є важливим, коли відбувається реконструкція старої, будівництво нової магістралі на території підприємства або планується зміна величини транспортних потоків.

Тобто виникає ситуація, коли неможливо здійснити замір рівня забруднення на об’єкті. Тоді основним інструментом розв’язання цієї задачі є математичне моделювання. Слід зауважити, що в поширенні забруднюючих речовин основну роль відіграє аеродинаміка повітряних потоків, що формуються поблизу різних перешкод, будівель тощо [84]. Прогнозування хімічного забруднення в робочих зонах біля автомагістралей стосується загалом задачі масопереносу. Тому для її розв’язання, а також розв’язання задачі оцінювання шумового забруднення біля транспортних магістралей використовуються емпіричні моделі, модель Гаусса, аналітичний розв’язок рівняння масопереносу [15, 49, 50, 57, 66, 82, 88, 90, 97, 102, 103, 106, 107, 113, 115–118, 126, 162]. Емпіричні моделі являють собою алгебраїчні співвідношення, що пов’язують, наприклад, концентрацію забруднювача на певній відстані від магістралі з деякими параметрами, що, на думку розробника моделі, суттєво впливають на рівень забруднення. Побудова емпіричних моделей базується на обробці даних експериментальних досліджень (рис. 1.2).

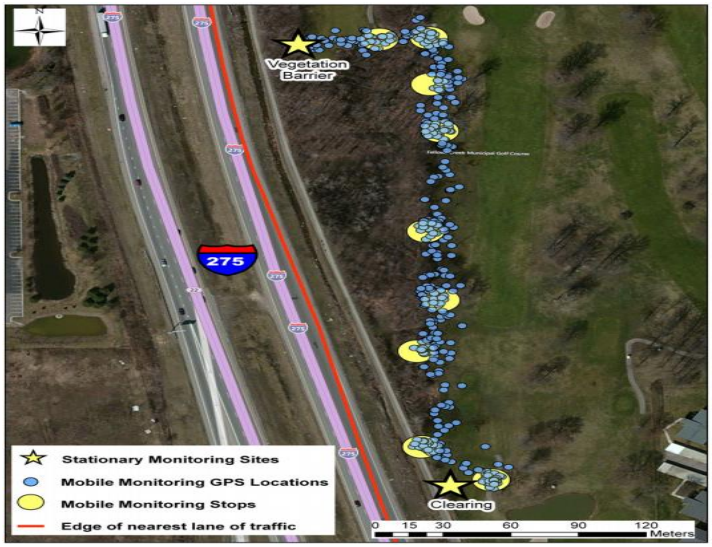


Рисунок 1.2 – Локація точок для вимірювання концентрації забруднювача біля транспортної магістралі [139]

Емпіричні моделі дуже зручні для практичного використання, тому що дозволяють швидко отримати необхідні дані, але мають певні недоліки:

1. Моделі використовуються для випадків, що подібні умовам, за яких проводився експериментальний вимір на існуючому об’єкті;

2. Певні параметри моделі не мають фізичного пояснення, перевірка таких параметрів дуже складна;

3. Модель може використовуватися лише в діапазоні тих параметрів, що існували під час виконання експерименту (наприклад, для певних значень швидкості повітря);

4. Моделі дають «точковий» результат, тобто значення невідомої величини для певної точки біля магістралі, але не розподіл (поле) цієї величини;

5. Моделі не дозволяють врахувати специфічні фактори, наприклад рельєф місцевості. За наявності такої «проблеми» в моделі використовують спеціальні коефіцієнти для оцінювання впливу рельєфу на рівень забруднення. Тобто вплив рельєфу враховується опосередковано.

Для оцінювання рівня забруднення робочих зон дуже активно використовується модель Гаусса, що базується на аналітичному розв’язку рівняння масопереносу та використанні ряду емпіричних співвідношень [49, 50, 57, 107, 115–118, 157, 161, 167]. Ця модель дозволяє швидко визначити розмір зон хімічного забруднення та потребує незначного часу на виконання розрахунків на персональному комп’ютері. Модель Гаусса реалізована у вигляді програмних пакетів типу «AERMOD», «ALOHA» та інші [116, 148, 159, 176, 190], що активно використовуються в країнах Євросоюзу, США для оцінювання рівня забруднення робочих зон. Але модель Гаусса має суттєві обмеження: вона не може бути використана для оцінювання рівня забруднення робочих зон, якщо потрібно врахувати вплив різних перешкод (наприклад, захисних бар’єрів) на формування зон забруднення. Також цю модель неможливо застосовувати для оцінювання рівня забруднення робочих

зон за несприятливих метеоумов, що певним чином звужує її робочий діапазон.

Найбільш потужним інструментом теоретичного розв’язання задач з оцінювання рівня забруднення робочих зон є використання CFD-моделювання [3, 4, 12–15, 28, 37, 38, 83, 87, 95, 109, 115, 120, 122–124, 126, 128, 136, 145–147, 154, 170, 172, 189, 192]. Визначення концентрації домішки, рівня шумового забруднення тощо в цих моделях здійснюється на базі фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища (рівняння Ейлера, рівняння Нав’є-Стокса, рівняння для потенціалу швидкості, рівняння акустики, рівняння тепломасопереносу). Наприклад, на рис. 1.3 показано поле акустичного тиску, що було отримано методом CFD-моделювання [150].

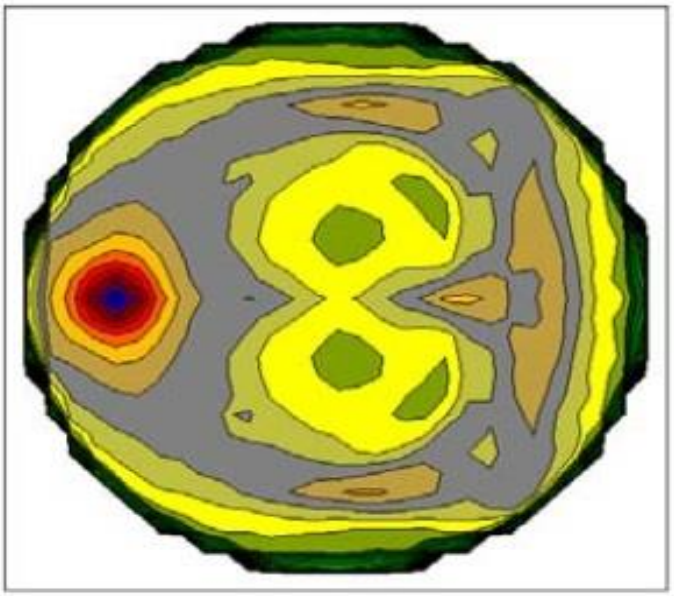


Рисунок 1.3 – Поле акустичного тиску, отримане методом CFD-моделювання [150]

Побудова CFD-моделей базується на використанні чисельних методів інтегрування фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища – рівняння гідроаеродинаміки, тепломасопереносу. Слід наголосити, що

історично за кордоном частіше для побудови CFD-моделей застосовується метод кінцевих елементів, а в Україні – метод кінцевих різниць. На практиці, як правило, використовуються готові, комерційні пакети програм для CFD-моделювання (ANSYS CFX, ANSYS Fluent, COMSOL та інші, рис. 1.3 [111, 112].

Перевагами методу CFD-моделювання є можливість виконувати теоретичні дослідження майже без обмежень на геометрію розрахункової області, враховувати значну кількість параметрів, що впливають на формування зон забруднення, та здійснювати дослідження для випадків, що дуже важко або неможливо дослідити експериментальним шляхом. Але існують також недоліки у використанні цього методу дослідження:

1. Висока вартість комерційних пакетів для проведення CFD-моделювання;
2. Високі вимоги до потужності персонального комп’ютера;
3. Необхідність мати ліцензію на виконання досліджень за допомогою комерційного пакета програм;
4. Значна кількість часу на виконання розрахунків (тривалість розв’язання однієї задачі може займати кілька діб);
5. Деякі «проблеми», що пов’язані з візуалізацією результатів моделювання [193].

Слід зауважити, що в Україні існує певний дефіцит авторських CFD-моделей, зокрема для визначення хімічного та шумового забруднення біля транспортних магістралей. Причини цього такі:

1. Авторська (самостійна) розробка CFD-моделі потребує певної кваліфікації дослідника, особливо якщо створюється CFD-модель, що має широкий робочий діапазон;
2. Значна кількість часу йде на розробку комп’ютерної програми, її тестування, налагодження (якщо створюється авторська CFD-модель).

Також аналіз літературних джерел показав, що існуючі в Україні CFD-моделі [96] орієнтовані на розв’язання вузькоспеціалізованих задач.

Далі було виконано аналіз існуючих методів захисту робочих зон, що розташовані поблизу транспортних магістралей. На підставі наукових публікацій [156, 158, 163, 166, 174, 179, 182, 196] виявлено такі способи захисту від забруднення робочих зон біля транспортних магістралей:

1. Використання спеціальних засобів пригнічення пилу на магістралі;
2. Використання рослинності;
3. Використання захисних бар'єрів (рис. 1.4);

Рисунок 1.4 – Вертикальний захисний бар'єр [174]

4. Використання відсмоктувальних пристроїв біля траси;
5. Використання пористого асфальту;
6. Використання спеціального покриття при будівництві траси (для виробництва такого покриття використовується TiO_2), що дозволяє «нейтралізувати» домішку [119, 174] (рис. 1.5).

а

б

а – блоки, що містять TiO_2 як домішку; *б* – дорога з поглинальним покриттям

Рисунок 1.5 – Використання спеціального покриття на дорозі [174]

Вибір конкретного засобу захисту робочих зон від забруднення потребує наукового обґрунтування його ефективності на стадії розробки проєкту. Тому дуже важливим є створення методів теоретичного оцінювання ефективності конкретного методу захисту при використанні його для конкретних умов експлуатації, оскільки виконання фізичних експериментів потребує багато часу [195].

1.4 Захист від пилового забруднення робочих зон біля залізниць

Транспортування вугілля на ТЕС, зокрема на Придніпровську ТЕС, здійснюється в напіввагонах, що призводить до виносу вугільного пилу з них та інтенсивного забруднення промислових майданчиків (рис. 1.6). Впливу цього забруднення зазанають як працівники ТЕС, так і інші робітники – прохідники, зчіплювачі вагонів, чергові.

Рисунок 1.6 – Забруднення повітря в робочих зонах у результаті виносу вугільного пилу з вагонів [55]

Внаслідок цього виникає важливе завдання: зменшення інтенсивності виносу вугільного пилу з вагонів з метою мінімізації рівня забруднення робочих зон. Аналіз літературних джерел із цієї проблеми показав, що зараз для зменшення інтенсивності виносу вугільного пилу з вагонів найчастіше використовують такі методи [14, 55, 74, 101, 121, 151, 152]:

1. Ущільнення вугілля у вагоні (рис. 1.7);
2. Використання брезенту на вагоні як «кришки» над вантажем;
3. Використання металевих кришок на вагоні;
4. Використання дефлекторів на корпусі вагона;
5. Зволожування вантажу;
6. Покриття вугілля спеціальним розчином.

Рисунок 1.7 –Ущільнене вугілля у вагонах [108]

Аналіз літературних джерел показує, що вказані вище методи мають суттєві недоліки [14]:

1. Для певних методів необхідно виготовлення, монтаж та використання спеціального устаткування (наприклад, для зволоження поверхні вантажу, для ущільнення вугілля у вагоні, для розподілу спеціальних розчинів на поверхні вантажу). Це підвищує вартість транспортування вугілля;

2. Установка дефлекторів на вагоні або використ

3. ання додаткової кришки потребує виведення вагона з експлуатації на деякий період та повернення вагона на завод для виконання певних технологічних операцій, що потребує часу та призводить до збільшення вартості вагона, а значить – вартості перевезення вантажу;

4. У разі зволоження вантажу з часом наявне випарювання води з поверхні вугілля та збільшення процесу пилоутворення;

5. У разі використання спеціальних розчинів з часом внаслідок вібрації вагона спостерігається руйнування плівки та зменшення сил адгезії між частками вантажу, що призводить до збільшення процесу пилоутворення;

6. Брезент під дією потоку повітря може злетіти з вагона та створити аварійну ситуацію.

Слід зауважити, що останнім часом збільшився інтерес до іншого методу зменшення виносу пилу з вагонів. Він полягає у використанні на

вагонах додаткових бортів [14], що дозволяють недорого й ефективно зменшити пилоутворення у вагоні при перевезенні вугілля.

Загалом проблема захисту від забруднення робочих зон внаслідок виносу вугільного пилу з вагонів є дуже складною. По перше, інтенсивність виносу пилу, а значить рівень забруднення робочих зон, залежить від багатьох факторів (швидкість потяга, швидкість повітряного потоку, форма вантажу тощо). По друге, виконання натурних експериментів для пошуку рішення цієї проблеми потребує значного часу на постановку експерименту, використання обладнання великої вартості, є також складність з вимірюванням кількості пилу, що виноситься з вагона, значні витрати часу на обробку експериментальних даних. Але основна проблема експериментального дослідження полягає в тому, що неможливо в натурних умовах досить точно визначити кількість пилу, що виноситься з поверхні вантажу. Це пов’язано з масштабом досліджуваного об’єкта (вагона або декількох вагонів). Тому більш поширеним для дослідження процесів виносу пилу з вагонів є використання лабораторного експерименту (рис. 1.8–1.9).

Рисунок 1.8 – Лабораторне дослідження виносу вугільного пилу з вагонів [152]

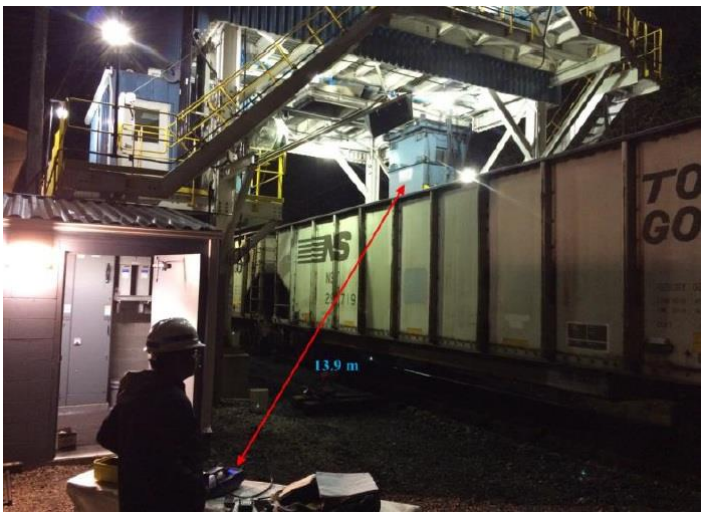


Рисунок 1.9 – Дослідження виносу вугільного пилу з реального вагона [138]

Для виконання комплексних досліджень з визначення ефективності використання того чи іншого методу захисту від пилового забруднення робочих зон дуже важливо використовувати не тільки метод фізичного моделювання, але й метод математичного моделювання [14]. Це дозволяє визначати ефективність методу захисту для більш широкого діапазону параметрів, що впливають на процес виносу вугільного пилу. Але для цього потрібно мати спеціалізовані математичні моделі, що дозволяють враховувати ті суттєві фактори, що впливають на пилоутворення. Аналіз літературних джерел показав існування обмеженої кількості таких спеціалізованих моделей як в Україні, так і у світі [14].

1.5 Захист робочих зон від пилового забруднення на об’єктах паливно-енергетичного комплексу

Функціонування паливно-енергетичного комплексу пов’язано з дуже інтенсивним пиловим забрудненням повітря різних робочих зон. Однією з відомих проблем є забруднення робочих зон біля штабелів вугілля (рис.1.10)

Прикладом такого забруднення є пилове забруднення промислового майданчика від сховища вугілля на території Придніпровської ТЕС.

Рисунок 1.10 – Штабель вугілля
(фото: https://himpartner1.kz/p56577441-reagent-ekobarer-dlya.html)

Штабелі вугілля, що створюються на території ТЕС, мають великі розміри. Під впливом повітряного потоку відбувається відривання часток вугільного пилу від поверхні штабеля та його поширення на досить значну відстань, що призводить до пилового забруднення багатьох робочих зон на території ТЕС. Крім цього, пил потрапляє в салон техніки (авто, навантажувачі тощо), що працюють на території ТЕС. У зв’язку із цим виникає дуже важлива задача – зниження інтенсивності виносу пилу від поверхні штабеля з метою зменшення рівня пилового забруднення в робочих зонах. Для зменшення інтенсивності виносу вугільного пилу від штабелів найчастіше використовують такі методи [75, 143]:

1. Використання захисних екранів біля штабеля;
2. Зволоження поверхні штабеля;
3. Покриття поверхні штабеля спеціальним розчином;
4. Подавання води в пилову хмару.

Особливо важливо зауважити, що зараз в Україні не існує методики оцінювання ефективності пилопригнічення при емісії вугільного пилу від штабелів або визначення ефективності використання захисних екранів (бар'єрів) для зменшення рівня забруднення повітря в робочих зонах.

Розв'язок цієї задачі є дуже складним. Це пов'язано з тим, що інтенсивність виносу вугільного пилу від поверхні штабелів залежить від багатьох факторів, а саме:

1. Форми штабелю;
2. Вологості вугілля;
3. Швидкості та напряму повітряного потоку;
4. Наявності поблизу штабелю різного роду перешкод;
5. Марки вугілля тощо.

Розглядаючи проблему забруднення повітря в робочих зонах при емісії пилу від штабелів вугілля, слід виокремити дві дуже важливі задачі:

1. Прогнозування розмірів та інтенсивності областей пилового забруднення біля штабелів;

2. Оцінювання ефективності захисних методів, що розробляються для зменшення рівня забруднення повітря в робочих зонах.

Для розв'язання першої задачі, тобто для аналізу інтенсивності та визначення розмірів областей забруднення в робочих зонах біля штабелів вугілля, використовуються метод фізичного моделювання, аналітичні моделі та модель Гаусса (для розрахунку розмірів зон забруднення, але без урахування геометричної форми штабеля), CFD-моделювання [107, 123, 185, 186, 188].

Слід наголосити, що теоретичне визначення ефективності методів, що розробляються для забезпечення нормального мікроклімату біля штабелів вугілля, можливе лише за допомогою CFD-моделювання. Це зумовлено такими причинами:

1. Аналітичні моделі (наприклад, пакет SLAB розробки США), моделі Гаусса (наприклад, пакет AERMOD розробки США) не враховують

нерівномірне поле швидкості повітря, тому не можуть бути використані для отримання обґрунтованих даних щодо поширення домішки в робочих зонах;

2. Аналітичні моделі, моделі Гаусса враховують джерело викиду домішки (пил, метан тощо) лише як «точку», тобто, наприклад, форма виїмки, штабеля вугілля або кар'єру в цьому випадку до уваги не береться. Це означає, що під час моделювання не виконується геометрична подібність явищ;

3. Гауссові моделі та аналітичні моделі не враховують режим викиду пилу (наприклад, інтенсивність виділення пилу від різних частин штабеля вугілля різна та залежить від локальної швидкості повітря біля поверхні штабеля).

Гауссові моделі та створені на їх основі комерційні пакети програм використовуються для оцінювання впливу джерел емісії (штабелі вугілля, відвали тощо) на інтенсивність забруднення повітря на достатній довжині від джерела забруднення [186], а не в робочих зонах, що розташовані біля джерел забруднення.

Як свідчать результати системного аналізу закордонних публікацій, зараз у світі особлива увага приділяється створенню CFD-моделей для визначення рівня забруднення робочих зон та їх захисту біля штабелів вугілля. За кордоном CFD-моделі стають, по суті, основним методом теоретичного дослідження, коли є необхідність визначити закономірності формування зон пилового забруднення та ефективність того чи іншого методу захисту робочих зон. Наприклад, на рис. 1.11 показано розрахункову область у задачі про CFD-моделювання захисту робочих зон від пилового забруднення при використанні біля штабеля вугілля захисного екрана, а на рис. 1.12 – зону забруднення біля штабеля, що була отримана методом CFD-моделювання.

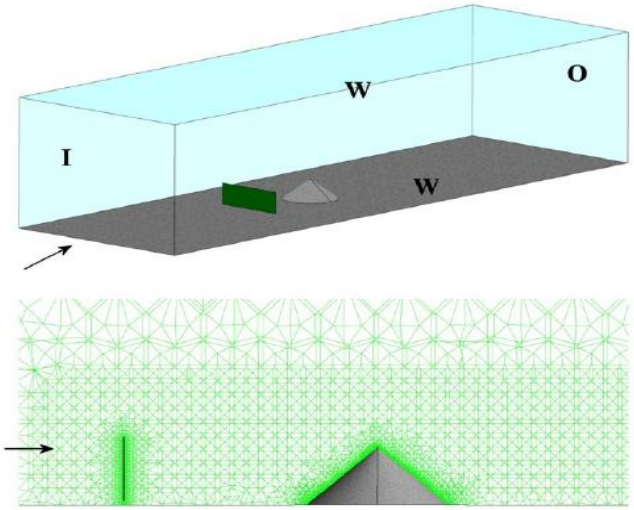


Рисунок 1.11 – Формування розрахункової області в задачі про CFD-моделювання забруднення повітря біля штабеля [189]

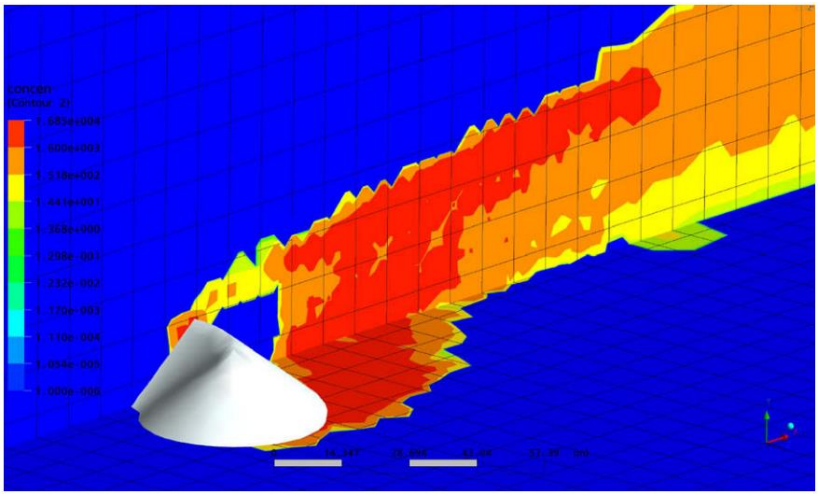


Рисунок 1.12 – CFD моделювання забруднення повітря біля штабеля [147]

Слід зауважити, що існуючі методи дослідження з оцінювання забруднення в робочих зонах орієнтовані на умови конвективного стану атмосфери. Але для несприятливих метеоумов (штиль, інверсія) практично відсутні методи оцінювання рівня забруднення повітря в робочих зонах. Як відомо, за несприятливих метеоумов може спостерігатися дуже значне

забруднення робочих зон, що потребує розробки додаткових методів оцінювання рівня забруднення повітря.

Таким чином, можна стверджувати, що в рамках цього класу задач за кордоном основним методом розв'язання є метод CFD-моделювання. На закінчення зауважимо, що критичний аналіз літературних джерел дає підставу для висновку, що в Україні існує обмежена кількість CFD-моделей, які можна використовувати для розв'язання таких складних багатопараметричних задач, як визначення рівня небезпеки в робочих зонах об'єктів паливно-енергетичного комплексу.

1.6 Методи оцінювання рівня пожежного ризику

Рівень пожежного ризику є дуже великим у багатьох країнах світу. Кількість пожеж у світі має тенденцію до зростання. На території об'єктів паливно-енергетичного комплексу пожежі можуть виникати на промисловому майданчику, при транспортуванні нафтопродуктів, на АЗС, всередині промислових приміщень тощо. Тобто ризик виникнення пожеж на цих об'єктах дуже великий. Пожежа супроводжується певними уражаючими факторами: поява небезпечних продуктів горіння, конвективний перенос нагрітого повітря, теплове випромінювання. Ці фактори викликають отруєння, термічне ураження та загибель працівників. У світі побудова математичних моделей для оцінювання розвитку пожежі, ризику ураження працівників залежить від виду пожежі та конкретної задачі, а саме:

1. Лісові пожежі;
2. Пожежі в метро, тунелях;
3. Пожежі на нафто- та газосховищах;
4. Пожежі в житлових будинках;
5. Пожежі у великих будівлях, що мають соціальне призначення;
6. Пожежі на транспорті;

7. Пожежі у виробках;

8. Пожежі на об’єктах енергетичного комплексу.

Також важливо вказати, що математичне моделювання використовується як потужний інструмент дослідження для визначення ефективності різних методів гасіння пожежі та рішення супутніх задач, наприклад:

1. Гасіння полум’я піною;

2. Гасіння полум’я спеціальними засобами;

3. Прогнозування нагрівання конструкцій при пожежі тощо.

Слід зауважити, що в ході розв’язання задач цього класу виникає потреба розв’язання певних «субзадач», наприклад:

1. Оцінювання ризику термічного ураження працівників на відкритій місцевості, біля місця пожежі;

2. Оцінювання ризику термічного ураження працівників у робочих приміщеннях при припливі в них нагрітого повітря;

3. Оцінювання ефективності використання водяної завіси тощо.

Залежно від конкретної задачі (наприклад, дослідження розвитку пожежі або гасіння пожежі водою чи спеціальними засобами) на практиці використовують моделі трьох класів [1, 8, 53, 54, 59, 61, 63, 65, 72, 83, 86, 137]: емпіричні (або статистичні) моделі, аналітичні моделі та CFD-моделі. Емпіричні (або статистичні) моделі базуються на обробці результатів експериментів та дозволяють визначити коефіцієнти, параметри, що необхідні для швидкого розв’язання задачі або для замикання моделюючих рівнянь (наприклад, емпіричні залежності з визначення швидкості випарювання води). Ці моделі дуже зручні для виконання інженерних розрахунків. Але їх використання можливе тільки для умов, що відповідають умовам, за яких були виконані експерименти та отримані ці моделі.

Аналітичні моделі, тобто точний розв’язок моделюючого рівняння, дають можливість швидко розрахувати низку процесів, що є характерними при пожежах (наприклад, оцінювання термічного ураження працівників

випромінюванням під час пожежі). Але відомо, що аналітичний розв'язок задачі можливо отримати при ряді спрощень у математичній постановці задачі. Тому коло використання цих моделей обмежене. Їх можливо застосовувати для виконання експрес-розрахунків, коли швидко необхідно розв'язати значну кількість задач.

У процесі розв'язання задач з охорони праці при пожежах особливо важливу роль відіграє CFD-моделювання. Лише на базі CFD-моделей можливо отримати теоретичним шляхом дані, що відповідають вимогам сучасності. Математичною основою цих моделей є, як правило, рівняння Нав'є-Стокса, рівняння тепломасообміну та додаткові моделюючі рівняння залежно від конкретної задачі. Використання рівнянь Нав'є-Стокса потребує використання дуже дрібної сітки для «відтворення» в чисельній моделі в'язкості. Наслідок цього – значні витрати часу на розв'язання задачі та необхідність використання потужних комп'ютерів. Також необхідно відзначити ще одну важливу проблему, що виникає в ході практичної реалізації рівнянь Нав'є–Стокса, – це проблема моделювання турбулентності. На сьогодні на практиці використовується декілька моделей турбулентності [3, 181], наприклад: алгебраїчні моделі, $k-\varepsilon$ модель, LES-моделювання, DNS-моделювання та ін. Наявність такої кількості моделей турбулентності свідчить про те, що зараз немає єдиної, універсальної моделі. Деякі моделі більш «ефективні» для опису пристінних течій, інші – в області вільного струменю тощо. Крім цього, існує проблема «замикання» моделі турбулентності шляхом використання емпіричних констант. Наприклад, у табл. 1.1 [3] наведено дані щодо констант в $k-\varepsilon$ моделі.

Використання емпіричних констант для інших умов потребує їх обґрунтування.

Таблиця 1.1 – Орієнтовні значення емпіричних констант $k-\varepsilon$ моделі [3]

Константа	Значення	Джерело оцінки
Pr_k	0,5	Умова опису як логарифмічного профілю швидкості в турбулентному приграничному шарі, так і швидкості росту зони змішування в автомодельній задачі про зсувне перемішування
Pr_ε	0,75	
c_μ	0,09	
$c_{\varepsilon 1}$	1,30	
$c_{\varepsilon 2}$	1,92	Експериментальні дані із затухання турбулентності в однорідному потоці за решіткою
$c_{\varepsilon 3}$	4/3	Еволюція однорідної турбулентності при швидкому однорідному стискуванні
$c_{\varepsilon 0}$	$\approx 1,0$	Експериментальні дані по ширині зони перемішування для автомодельної задачі про гравітаційне перемішування рідин, що не

У табл. 1.2 наведено дані з роботи [181] про перспективи використання різних моделей турбулентності.

Таблиця 1.2 – Перспективи використання різних моделей турбулентності [181]

Модель	Необхідне число вузлів сітки	Необхідне число кроків по часу	Готовність
3D Steady RANS	10^7	10^3	1985
3D Unsteady RANS	10^7	$10^{3,5}$	1995
DES	10^8	10^4	2000
LES	$10^{11,5}$	$10^{6,7}$	2045
DNS	10^{16}	$10^{7,7}$	2080

Аналіз даних з табл. 1.1 свідчить про те, що у найближчій перспективі не може бути «щоденного» використання високого класу моделей турбулентності для розв’язку прикладних задач.

Критичний аналіз літературних джерел виявив обмежену кількість авторських CFD-моделей, що були розроблені в Україні для розв’язання задач цього класу або інших задач в галузі охорони праці. Зокрема, це стосується проблем оцінювання ризику термічного або хімічного ураження водолазів під час виконання підводних робіт. В Україні переважно використовуються комерційні пакети програм (наприклад, ANSYS Fluent, SOFIA та ін.) для розв’язання різних задач у галузі пожежної безпеки.

1.7 Постановка завдань дослідження

На підставі виконаного аналізу наукових публікацій було визначено завдання наукових досліджень:

1. Виконати аналіз та дослідження з визначення шкідливих факторів на об’єктах паливно-енергетичного комплексу (на прикладі Придніпровської ТЕС);

2. Виконати критичний огляд методик оцінювання шкідливих факторів у робочих зонах із застосуванням системного аналізу існуючих методів та моделей та визначити основні наукові напрямки методичних підходів прийняття інструментарію наукових досліджень;

3. Розробити багатофакторні чисельні моделі, комп’ютерні програми (коди), що дозволяють спрогнозувати закономірності формування областей забруднення та їх вплив на працівників у робочих зонах на промислових майданчиках ТЕС з урахуванням технологічних процесів та наявності хімічного, теплового, шумового та пилового забруднення;

4. На основі науково-практичного обґрунтування розробити комплексний підхід, спрямований на зниження негативного впливу

шкідливих факторів на робочих місцях об’єктів паливно-енергетичного комплексу;

5. З урахуванням можливості виникнення екстремальних ситуацій оцінити ефективність використання захисних засобів.

Висновки до розділу 1

На основі критичного аналізу літературних джерел встановлено:

1. В Україні використовується обмежена кількість чисельних моделей, що являють собою сучасний інструмент наукових досліджень у галузі охорони праці за кордоном.

2. Актуальним завданням є створення економічних та ефективних чисельних моделей, що дозволяють досліджувати закономірності формування областей забруднення в робочих зонах, що розташовані на території об’єктів паливно-енергетичного комплексу: біля штабелів вугілля, залізничної колії, автодороги тощо, а також у випадку викидів, що відбуваються за несприятливих метеоумов.

3. В Україні існує дефіцит чисельних моделей оцінювання ефективності засобів захисту робочих зон, що розташовані біля автотрас, від хімічного забруднення; потрібен подальший пошук ефективних методів зниження рівня хімічного забруднення цих робочих зон.

4. На сьогодні спостерігається дефіцит чисельних моделей для оцінювання термічного забруднення повітря в робочих приміщеннях та ризику теплового ураження працівників в разі припливу в приміщення нагрітого повітря.

5. У країні практично відсутні багатовимірні чисельні моделі для оцінювання рівня шумового забруднення робочих зон біля залізничних магістралей, що дозволяли б враховувати вплив рельєфу, екранів на формування зон шумового забруднення. Це потребує активної розробки

таких моделей для науково обґрунтованого оцінювання ефективності використання шумозахисних екранів.

6. Важливим завданням є розробка багатофакторних чисельних моделей для оцінювання ризику термічного ураження працівників у випадку пожеж.

7. Потребує подальшого розвитку науковий напрям зі створення чисельних моделей для оцінюванню ефективності використання різних засобів гасіння під час пожеж.

8. У науковій літературі практично відсутні методи оцінювання ризику термічного або хімічного ураження водолазів під час проведення підводних робіт.

РОЗДІЛ 2
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БАР'ЄРІВ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ВПЛИВУ ШКІДЛИВИХ ФАКТОРІВ НА ПРАЦІВНИКІВ

У розділі розглядаються результати наукових досліджень із визначення ефективності використання різних бар'єрів для зниження рівня хімічного та шумового забруднення в робочих зонах при роботі автотранспорту на підприємствах паливно-енергетичного комплексу.

Основні положення цього розділу опубліковані автором у наукових працях [12, 38, 39, 43, 45, 48, 127–129, 131, 133].

2.1 Використання бар'єрів з додатковими елементами для зниження рівня хімічного забруднення в робочих зонах

Транспортування вугілля до ТЕС, котелень може здійснюватися за допомогою автотранспорту (рис. 2.1). Але вантажні автомобілі, що працюють на дизельному паливі, є надзвичайно інтенсивними джерелами хімічного забруднення повітря біля транспортного коридору. Зниження такого хімічного забруднення в робочих зонах є дуже важливою задачею в галузі охорони праці.

Рисунок 2.1 – Доставка вугілля автотранспортом до котельні (зображення: https://dnpruchei.ru/sklad-uglya-dlya-kotelnoy)

Ефективним засобом захисту робочих зон від хімічного забруднення є використання бар’єрів, що дозволяють змінити аеродинаміку повітряного потоку та локально зменшити концентрацію забруднюючих речовин у робочий зоні [127, 129, 140, 173, 174, 179, 182, 196].

Зараз використовують вже не тільки вертикальні бар’єри (рис. 2.2), також існують бар’єри з додатковими елементами, наприклад пластиною, що розташована під кутом (рис. 2.3).

Рисунок 2.2 – Вертикальний бар’єр [174]

Рисунок 2.3 – Бар’єр з додатковим елементом у вигляді пластини, що розташована під кутом [174]

На ефективність роботи захисних бар’єрів впливає дуже багато факторів, а саме: розміри захисного бар’єра, його розташування відносно джерела забруднення, інтенсивність емісії забруднюючих речовин, напрям та швидкість повітряного потоку тощо. Тобто в разі практичного застосування захисних бар’єрів потрібно враховувати місцеві умови. Використання лабораторного експерименту для визначення ефективності роботи бар’єрів (рис. 2.4) потребує значного часу на постановку, проведення експерименту та аналіз отриманих даних. Виконання натурного експерименту (модель, що зроблена в масштабі 1:1) на спеціальних майданчиках не дозволяє повною мірою відновити всі місцеві умови, де планується використання бар’єра. Крім цього, проведення натурного експерименту має високу вартість.

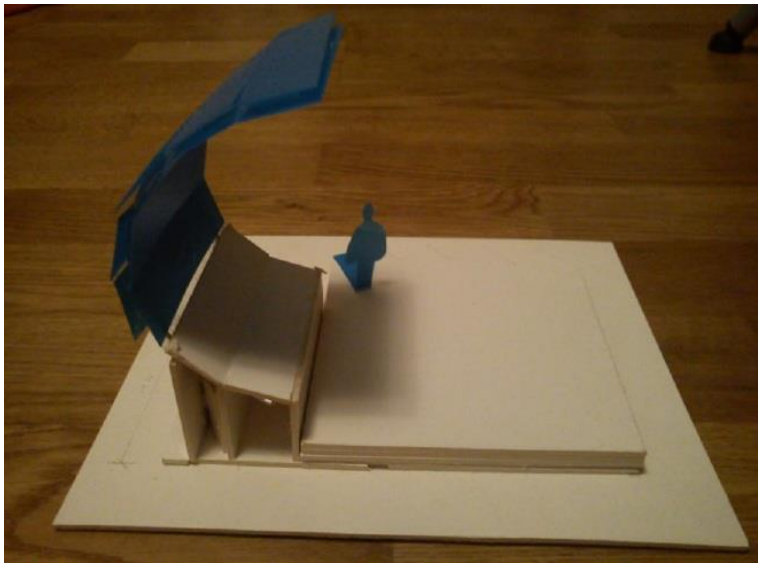


Рисунок 2.4 – Бар’єр з додатковим елементом у вигляді вигнутої пластини, фізична модель [173]

Тобто в ході фізичного експерименту не завжди можливо дослідити ефективність роботи бар’єра для всіх умов експлуатації. Це є суттєвим обмеженням у нашому випадку. Тому дуже важливим є створення багатофункціональних математичних моделей, що дозволяють ефективно використовувати захисні бар’єри.

Нижче розглядається побудова чисельної моделі для оцінювання ефективності використання захисних бар’єрів для зниження рівня хімічного забруднення робочих зон біля автотрас.

Розглядається автодорога з безперервним чотирирядним рухом, ширина однієї смуги руху становить 3,75 м. На одному узбіччі передбачається розміщення захисних бар’єрів, оскільки там розташовуються робочі зони (рис. 2.5). Ставиться задача розрахунку зони забруднення атмосферного повітря при емісії забруднюючих речовин від автотранспорту (NO, NO_2) та оцінка впливу бар'єрів різної висоти й форми на зменшення значення концентрації шкідливих речовин за екраном.

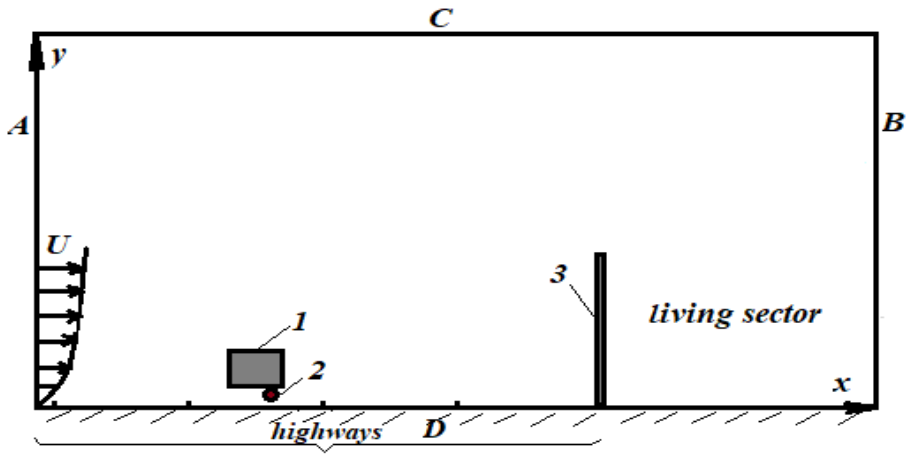


Рисунок 2.5 – Схема розрахункової області:
1 – автотранспорт, *2* – джерело емісії (вихлопна труба автомобіля), *3* – бар’єр; *A*, *B*, *C*, *D* – межі розрахункової області.

Як відомо, під дією сонячного світла h_ν ($\lambda \le \pm 430\,нм$) діоксид азоту розпадається на оксид азоту та атомарний кисень, який перетворює кисень O_2 в озон O_3. Накопичуючись у нижніх шарах атмосфери, ці речовини шкідливо впливають на організм людини. Основними реакціями при цьому є реакції (2.1) – (2.3) [135, 160, 169, 177]:

$$NO_2 + h_\nu \xrightarrow{J} NO + O, \quad (2.1)$$

$$O + O_2 \rightarrow O_3, \quad (2.2)$$

$$NO + O_3 \xrightarrow{k_1} NO_2 + O_2, \quad (2.3)$$

де J – параметр швидкості реакції для процесу фотолізу залежно від кількості ультрафіолетового випромінювання;

k_1 – параметр швидкості реакції для NO, 1/с.

У цій роботі обмежимося розглядом цих процесів біля автомагістралі. Вибір тільки цих забруднюючих речовин пов'язаний з тим, що для розрахунку хімічної трансформації викидів у атмосфері необхідно знати швидкості їх хімічних реакцій, які визначаються експериментальним шляхом. Такі дослідження займають тривалий час та є дуже коштовними. Для даних перетворень відомі швидкості хімічних реакцій.

Розв'язок задачі про прогнозування забруднення атмосферного повітря викидами від автотранспорту буде здійснюватися у два етапи.

Оскільки розглядається перенесення речовин NO, NO_2, O_3 в атмосферному повітрі й враховується, що на зміну концентрації цих речовин впливають швидкість повітряного потоку, атмосферна дифузія, інтенсивність викидів, то для моделювання використовується рівняння масопереносу. Це рівняння показує зміну концентрації NO, NO_2, O_3 у досліджуваній області з плином часу. Тому на першому етапі розв’язку буде моделюватися процес перенесення зазначених речовин в атмосферному повітрі на основі рівнянь масопереносу (2.4)–(2.6):

$$\frac{\partial C_{NO}}{\partial t}+\frac{\partial (uC_{NO})}{\partial x}+\frac{\partial (vC_{NO})}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C_{NO}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C_{NO}}{\partial y}\right)+$$
$$+\sum_{i=1}^{n}Q_{NOi}(t)\delta\left(x-x_{0i},y-y_{0i}\right), \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial C_{NO_2}}{\partial t}+\frac{\partial (uC_{NO_2})}{\partial x}+\frac{\partial (vC_{NO_2})}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C_{NO_2}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C_{NO_2}}{\partial y}\right)+$$
$$+\sum_{i=1}^{n}Q_{NO_2i}(t)\delta\left(x-x_{0i},\ y-y_{0i}\right), \tag{2.5}$$

$$\frac{\partial C_{O_3}}{\partial t}+\frac{\partial (uC_{O_3})}{\partial x}+\frac{\partial (vC_{O_3})}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C_{O_3}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C_{O_3}}{\partial y}\right), \tag{2.6}$$

де $C_{NO}(x,y,t)$, $C_{NO_2}(x,y,t)$, $C_{O_3}(x,y,t)$ – концентрація забруднюючих речовин NO, NO_2, O_3, кг/м^3;

Q_{NOi}, $Q_{NO_2 i}$ – інтенсивність викиду NO, NO_2 від *i*-го джерела емісії (автотранспорту), кг/(с$\cdot$м^3);

u, v – компоненти вектора швидкості вітру, м/с;

$\mu=(\mu_x,\mu_y)$ – коефіцієнт турбулентної дифузії, м^2/с;

x_{0i}, y_{0i} – координати джерел викиду забруднюючої речовини (автодороги), м;

$\delta\left(x-x_{0i},y-y_{0i}\right)$ – дельта-функція Дірака, яка моделює наявність викиду забруднювача.

Значення коефіцієнтів дифузії розраховуються за емпіричними формулами, наприклад: $\mu_x=k_0\cdot U$ [49, 50]. Значення параметра k_0 залежить від ступеня стійкості атмосфери. При розрахунках, що наведені в розділі, приймається $k_0=0.1$, U – локальна швидкість вітру, м/с. $\mu_y=k_1\left(\frac{Y}{Y_1}\right)^m$, $k_1=0.1$ м^2/с [49, 50], $Y_1=1\,м$, $m\approx 1$.

Дельта-функція дорівнює нулю всюди, окрім осередків, де розташоване *i*-те джерело забруднення. Емісія забруднюючих речовин від автотранспорту моделюється точковими джерелами заданої інтенсивності Q_{NOi}, $Q_{NO_2 i}$, n – кількість джерел забруднення.

У дискретному вигляді дельта-функція Дірака «розмазується» по площі (обсягу) різницевого осередку зі збереженням сумарної кількості забруднення [109].

На другому етапі розв'язання задачі здійснюється розрахунок хімічної трансформації речовин в атмосферному повітрі з використанням таких залежностей [160]:

$$\frac{\partial C_{NO}}{\partial t} = -k_1 \cdot C_{NO} \cdot C_{O_3} + J \cdot C_{NO_2}, \tag{2.7}$$

$$\frac{\partial C_{NO_2}}{\partial t} = k_1 \cdot C_{NO} \cdot C_{O_3} - J \cdot C_{NO_2}, \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial C_{O_3}}{\partial t} = -k_1 \cdot C_{NO} \cdot C_{O_3} + J \cdot C_{NO_2}. \tag{2.9}$$

Відомо, що викид NO_2 становить величину порядку 5 % від викиду NO_x, а інша частина викиду, порядку 95 %, – це викид NO. Хімічні реакції та реакція фотолізу взаємопов'язані в атмосфері. Швидкість фотолізу й параметри швидкості реакції, що залежать від температури, визначаються експериментально.

Діоксид азоту розкладається з виділенням оксиду азоту, а останній окиснюється озоном. У результаті послідовних реакцій одна молекула оксиду азоту сприяє знищенню в середньому 10 молекул озону, адже NO_2 більш токсичний ніж NO.

Для чисельного розв'язання рівнянь (2.7)–(2.9) з урахуванням залежностей (2.10)–(2.11) розроблена програма, яка реалізує метод Ейлера [100].

У роботі розглядається розсіювання викидів від автотранспорту для випадку, коли біля автодороги розташовуються захисні бар'єри (екрани). У цьому випадку в області дослідження буде формуватися нерівномірне поле швидкості повітряного потоку. Це поле необхідне для розв’язання моделюючих рівнянь (2.4)–(2.6). Для розрахунку повітряного потоку в таких умовах використовується модель потенційної течії. У цьому випадку моделюючим рівнянням є рівняння Лапласа для потенціалу швидкості [38, 109]:

$$\frac{\partial P^2}{\partial x^2} + \frac{\partial P^2}{\partial y^2} = 0. \qquad (2.10)$$

Ставляться відповідні граничні й початкові умови (рис. 2.5) [38, 109, 127, 129]:

– на межі A – потік входить у розрахункову область, для потенціалу швидкості ставиться гранична умова Неймана $\frac{\partial P}{\partial x} = U$, де U – відоме значення швидкості вітрового потоку, $U = U_1 \cdot \left(y / y_1\right)^{n_1}$ (U_1 – значення швидкості вітру на деякій фіксованій висоті, наприклад y_1=*1 м*, $n_1 \approx 0{,}15 - 0{,}69$, оскільки залежить від шорсткості підстильної поверхні й класу стійкості атмосфери, у роботі приймалося значення $n_1 = 0{,}15$) [49, 50];

– на межі B – потік виходить з розрахункової області, для потенціалу швидкості ставиться гранична умова Діріхле $P = P_0 + const$, де P_0 – деяка числова константа, що дорівнює 10000;

– на межі C – верхня межа, тверда непроникна стінка, ставиться умова непроникнення $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$;

– на межі D – нижня межа, тверда непрозора стінка, ставиться умова непроникнення $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$;

– на всіх твердих стінках має виконуватися умова непроникнення.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку розраховуються на основі залежностей [76, 109]:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}. \tag{2.11}$$

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа (2.10) використовується явна різницева схема. Спочатку рівняння Лапласа (2.10) зводиться до рівняння еволюційного вигляду із застосуванням встановлення розв'язку за часом [99, 100]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \tag{2.12}$$

де t – фіктивний час, при $t \to \infty$ розв'язок рівняння (2.12) наближається до розв'язку рівняння Лапласа (2.10).

А саме стаціонарне рівняння (2.10) є граничним випадком нестаціонарного рівняння (2.12), тобто коли розв'язок рівняння (2.12) перестає змінюватися в часі й виходить на стаціонарний режим, то це і є розв'язок рівняння (2.10). Для розв'язання цього рівняння необхідно задати початкову умову, тобто поле потенціалу при $t = 0$. Наприклад, можна прийняти $P = 20$ у всій розрахунковій області при $t = 0$.

Для чисельного інтегрування використовується різницева апроксимація похідних. Розглядається рівномірно розподілена прямокутна сітка в двовимірному просторі, кожна клітинка якої має розміри $\Delta x, \Delta y$ уздовж відповідної декартової осі. Координати вузлів сітки обчислюються як $(x, y)_{i,j} = (i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y)$, $i, j \in Z$. Час рівномірно дискретизується $t = n \cdot \Delta t$.

Для розв'язання рівняння (2.12) застосовується така різницева схема [133]:

$$P_{ij}^{n+1} = P_{ij}^{n} + \Delta t \frac{P_{i+1,j}^{n} - 2P_{ij}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{P_{i,j+1}^{n} - 2P_{ij}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}. \qquad (2.13)$$

За допомогою цієї явної залежності визначається поле потенціалу швидкості в усіх внутрішніх осередках розрахункової області.

За відомими значеннями потенціалу швидкості розраховуються компоненти вектора швидкості:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \; v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}. \qquad (2.14)$$

Для опису чисельного методу розв'язання рівнянь переносу (2.4) – (2.6) запишемо їх у вигляді узагальненого рівняння конвективно-дифузійного розсіювання домішки [77, 109]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y}\right) + \sum_{i=1}^{n} Q_{S\,i}(t)\delta(x - x_i)\delta(y - y_i), \qquad (2.15)$$

де S – концентрація $[NO], [NO_2], [O_3]$;

t – час;

u, v – компоненти вектора швидкості;

$\mu = \left(\mu_x, \mu_y\right)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії;

$Q_{S\,i}$ – інтенсивність емісії $\left[NO\right], \left[NO_2\right], \left[O_3\right]$;

$\delta\left(x - x_i\right)\left(y - y_i\right)$ – дельта-функція Дірака;

$\left(x_i, y_i\right)$ – координати розташування джерела емісії $\left[NO\right], \left[NO_2\right]$.

Для розв'язання рівняння (2.15) ставляться такі граничні умови [109] (рис. 2.4):

– на межі *A* – потік входить у розрахункову область, для концентрації цієї домішки ставиться гранична умова виду $S = S\big|_{вх}$ – фонова концентрація в момент часу $t = 0$, за відсутності даних значення концентрації приймається рівним нулю;

– на межі *B* – потік виходить з розрахункової області, у кінці розрахункової області в чисельній моделі виконується гранична умова виду $\frac{\partial S}{\partial x} = 0$, з фізичного погляду ця умова означає, що не враховується процес дифузії на межі виходу потоку;

– на межах *C, D* і на всіх твердих стінках насипу, екранів і автомобіля залежно від напрямку нормалі має виконуватися умова непроникнення.

Для чисельного інтегрування рівняння (2.15) здійснюється його розщеплення [109]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x}\right), \tag{2.16}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y}\right), \tag{2.17}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \sum_{i=1}^{n} Q_{S\,i}\left(t\right)\delta\left(x - x_i\right)\left(y - y_i\right). \tag{2.18}$$

Для чисельного розв’язання рівняння (2.16) застосовується така двокрокова схема розщеплення [109]:

– на першому кроці використовується залежність

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^{n} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^{+} S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^{+} S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \\ + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n} + S_{i+1,j}^{n}}{2\Delta x^2},$$

– на другому кроці використовується залежність

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^{-} S_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^{-} S_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \\ + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

де $u^{+} = \frac{u + |u|}{2}, u^{-} = \frac{u - |u|}{2}$.

Для чисельного розв’язку рівняння (2.17) застосовується така двокрокова схема розщеплення [109]:

– на першому кроці використовується залежність

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^{n} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^{+} S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^{+} S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \\ + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n} + S_{i,j+1}^{n}}{2\Delta y^2},$$

– на другому кроці використовується залежність

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^{-} S_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^{-} S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} +$$

$$+\Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

де $v^{+} = \frac{v + |v|}{2}, v^{-} = \frac{v - |v|}{2}$.

Для чисельного інтегрування рівняння (2.18) використовується метод Ейлера [100]. Він також застосовується для чисельного розв'язання рівнянь (2.7)–(2.9).

На базі розробленої чисельної моделі створено код Barrier-2 мовою програмування FORTRAN. До складу коду входять:

– VAK0.DAT – файл початкових даних;

– VAK*1* – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку поля потенціалу швидкості в області дослідження;

– VAK*2* – підпрограма типу SUBROUTINE для визначення значення поля швидкості повітря в області дослідження;

– VAK3 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв'язанні рівняння для потенціалу швидкості;

– VAK4 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв'язанні рівняння для масопереносу забруднюючих речовин;

– VVAK5 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля концентрації забруднюючих речовин в області дослідження;

– VAK – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку за методом Ейлера хімічної трансформації забруднювачів;

– V2AK – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку за методом Ейлера зміни концентрації забруднювачів унаслідок їхньої емісії.

Алгоритм розв'язання задачі:

1. У файл початкових даних вводиться інформація щодо розташування автомобілів на трасі, положення захисних бар’єрів, їх геометрична форма, інтенсивність емісії забруднювачів та інші дані.

2. Здійснюється чисельний розв’язок рівняння для потенціалу швидкості.

3. Визначається поле швидкості потоку повітря в області дослідження.

4. Розраховується зміна концентрації забруднювачів внаслідок їх емісії.

5. Розраховується процес конвективного та дифузійного переносу забруднювачів в області дослідження.

6. Розраховується зміна концентрації забруднювачів внаслідок їх хімічної трансформації.

7. Здійснюється друк поля концентрації забруднювачів у розрахунковій області для моменту часу t^{n+1}.

8. Розрахунок повторюється для визначення розподілу концентрації забруднювачів для нового моменту часу t^{n+1}.

Вихідні дані для моделювання:

1. Форма траси, положення автомобілів на трасі.

2. Форма захисного бар’єра.

3. Положення захисного бар’єра.

4. Інтенсивність емісії забруднювачів.

5. Швидкість повітряного потоку.

Виокремимо такі особливості розробленої математичної моделі:

1. Модель враховує вплив корпусу авто (або декількох авто) на формування поля швидкості повітря.

2. Модель враховує вплив захисного бар’єра на формування поля швидкості повітря.

3. Модель враховує різноманітне розташування авто на дорозі відносно захисного бар’єра та як це впливає на формування поля швидкості повітря.

4. Модель враховує хімічну трансформацію домішок у повітрі робочої зони.

5. Модель враховує інтенсивність та місце викиду шкідливих речовин.

6. Модель враховує вплив місцевих метеоумов на формування областей забруднення в робочих зонах.

Для тестування розробленої моделі була чисельно розв'язана задача, що має аналітичний розв'язок. Як відомо, з формального погляду, рівняння (2.12) еквівалентно нестаціонарному рівнянню теплопровідності. Тому підходом, що широко використовується для тестування чисельних моделей, є порівняння аналітичного розв'язку для рівняння теплопровідності з чисельним розв'язком рівняння вигляду (2.12). Розглядається процес теплопровідності в пластині, початкова температура якої дорівнює T_0, на межах – температура постійна та дорівнює 0. Ця задача моделюється, як було вказано, рівнянням вигляду (2.12). Аналітичний розв'язок задачі такий [89]:

$$T = T_0 \cdot erf\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \cdot erf\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right).$$

Початкові дані задачі: T_0=2000 $^{\circ}C$; розміри пластини 25 м × 25 м. Координати розрахункової точки: x = 1 м, y = 1 м, a = 1.

У табл. 2.1 показані результати розрахунку температури на базі аналітичного розв'язку та чисельної моделі.

На підставі даних цієї таблиці можливо зробити висновок про задовільне узгодження отриманих результатів.

Таблиця 2.1 – Температура в розрахунковій точці, ^{o}C

Час t, с	Розрахунок на базі аналітичної моделі	Розрахунок на базі чисельної моделі
9,76	64,08	65,16
12,76	48,67	49,13
17,30	35,91	36,44

Нижче наведено результати розв'язання задач з визначення ефективності використання захисних бар'єрів, що розташовані біля автодороги. Розглядалося кілька сценаріїв розташування автотранспорту і бар'єрів. Розрахунки виконувалися для таких даних: швидкість повітряного потоку 5 м/с, середня інтенсивність емісії оксидів азоту $Q_{NO_x} = 4{,}8$ г/(с·м) з яких NO_2 становить величину порядку 5 % від викиду NO_x, а NO – 95 %, геометричні розміри області – 25 м по осі Оx і 12,5 м по осі Оy, яка спрямована вертикально вгору. Координатами джерела викиду NO і NO_2 є координати місця розташування отвору вихлопної труби автомобіля. Приймається, що це точкове джерело викиду, тому в математичній моделі воно задається дельта-функцією Дірака δ_{ij}, а в чисельній моделі – положенням різницевої комірки, у якій розташовується джерело викиду, а саме $Q_{чисел.} = Q(t)_{ист.} / (\Delta x \Delta y)$, де $Q(t)_{ист.}$ – реальний викид NO і NO_2 від автомобіля, г/(с·м), $\Delta x \Delta y$ – площа різницевої комірки.

Викид від різних авто моделюється як набір точкових джерел. Оскільки використовується двомірна модель, то напрям вітру вибрано поперек автомагістралі (вздовж осі Оx). Розв'язується модельна задача з урахуванням дії екрана як бар'єра, а як автотранспорт розглядалися авто з розмірами: ширина – 1,7 м, висота – 1,6 м. Однак розрахункова програма дозволяє враховувати будь-які розміри автотранспорту. Відзначимо, що особливістю розробленої чисельної моделі є можливість врахування впливу корпуса авто на формування областей забруднення в робочих зонах біля дороги.

На першому етапі чисельних досліджень виконувалися розрахунки при діючому джерелі емісії (автотранспорті) на першій і четвертій смугах автодороги без наявності екрана (рис. 2.6), з наявністю екрана висотою H=2,8 м (рис. 2.7) й висотою H=5 м (рис. 2.8).

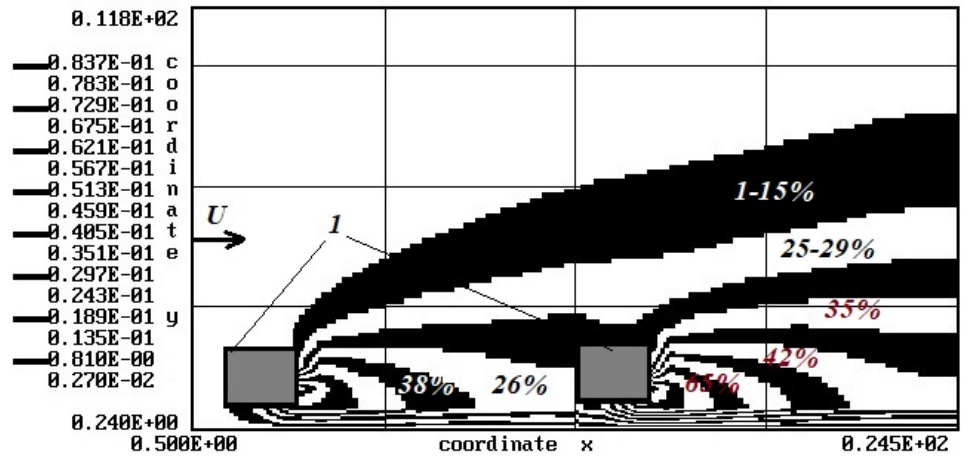


Рисунок 2.6 – Розподіл поля концентрації *NO* за відсутності бар'єра:

1 – джерела емісії (автомобілі).

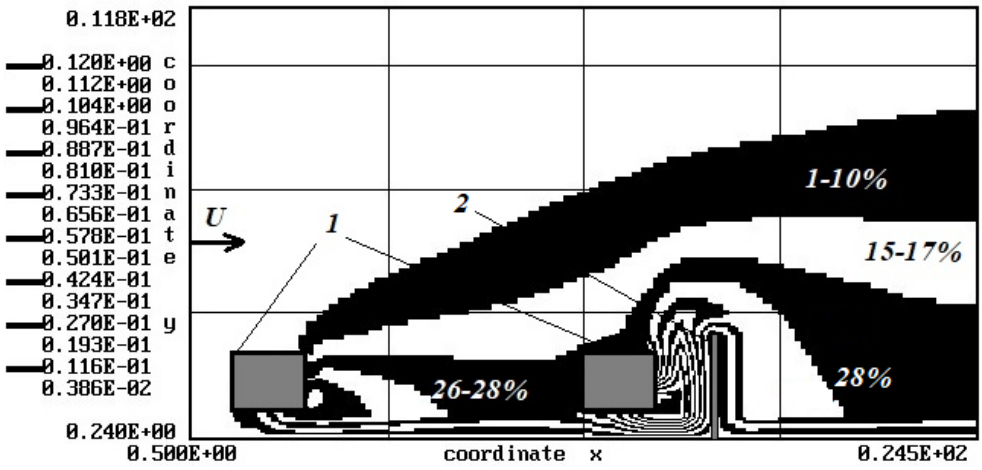


Рисунок 2.7 – Розподіл поля концентрації *NO* за наявності бар'єра висотою *H*=2,8 м:

1 – джерела емісії (автомобілі), *2* – бар'єр.

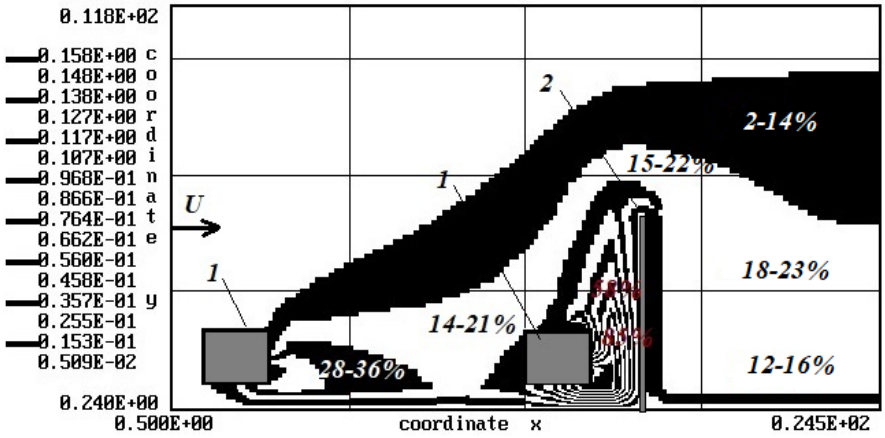


Рисунок 2.8 – Розподіл поля концентрації *NO* за наявності бар'єра висотою *H*=5 м:

1 – джерела емісії (автомобілі), *2* – бар'єр.

На рисунках показано розподіл концентрації *NO* в процентному відношенні від максимального значення концентрації. Добре видно, що екран висотою H=2,8 м дозволяє знизити значення концентрації *NO* за екраном від 42 % до 28 %, а екран висотою H=5 м знижує значення концентрації до 16 %.

На другому етапі чисельних досліджень виконувалося порівняння рівня концентрації за екраном при різній кількості джерел емісії на дорозі. Зокрема, розрахунки виконані при діючому джерелі емісії (автотранспорті) тільки на першій смузі автодороги (рис. 2.9), на першій та на четвертій смугах (рис. 2.8), на першій, другій та четвертій смугах (рис. 2.10) за наявності екрана висотою *H*=5 м у кожному варіанті розрахунку.

З отриманого розподілу концентрації можна бачити, що збільшення кількості джерел емісії на автодорозі призводить до збільшення значення концентрації *NO* за екраном від 10 % до 18 % навіть за наявності екрана досить великої висоти *H*=5 м.

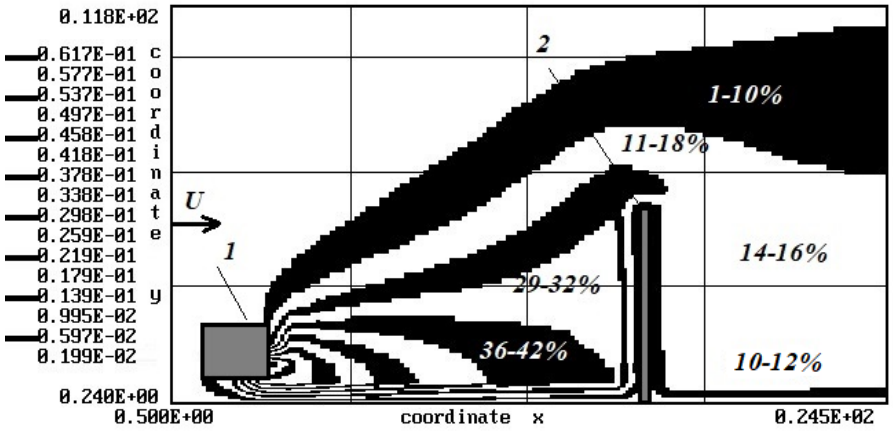


Рисунок 2.9 – Поле концентрації *NO* за наявності бар'єра висотою *H*=5 м:

1 – одне джерело емісії, *2* – бар'єр.

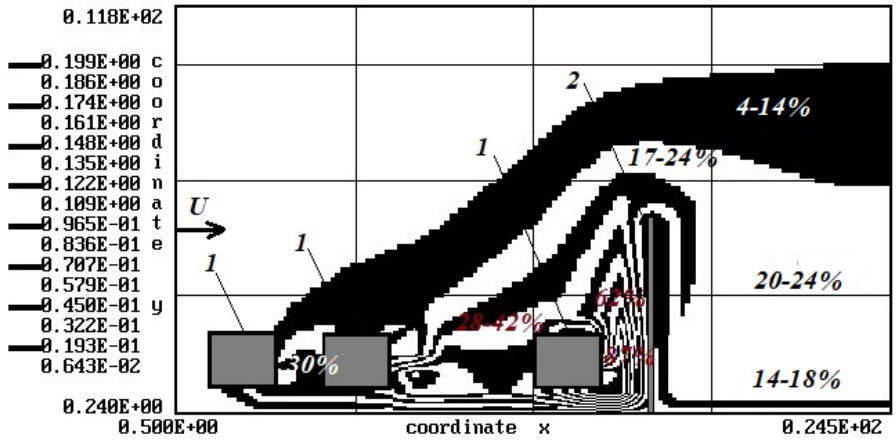


Рисунок 2.10 – Поле концентрації *NO* за наявності бар'єра висотою *H*=5 м:

1 – три джерела емісії, *2* – бар'єр.

На третьому етапі чисельних досліджень здійснювалися порівняльні розрахунки при діючих джерелах емісії (автотранспорті) з урахуванням їхньої геометричної форми (у вигляді прямокутників) і без урахування геометрії, тобто просто як точкового джерела (рис. 2.11), згідно з публікаціями інших авторів [7].

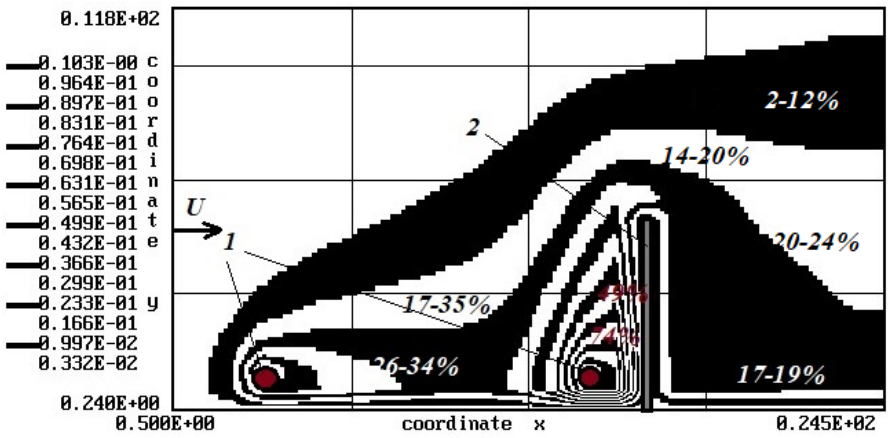


Рисунок 2.11 – Поле концентрації *NO* за наявності екрана висотою *H*=5 м:

1 – два джерела емісії без урахування геометрії, *2* – екран.

Порівняння розподілу концентрації на рис. 2.8 і рис.2.11 показує, що не врахування геометрії призводить до завищених значень концентрації приблизно на 5 %.

Проте, як видно з рис.2.10, у зоні між автомобілем, який розташований на четвертій смузі руху, і екраном спостерігається збільшення інтенсивності забруднення повітряного середовища. Це пов'язано з тим, що наявність екрана призводить до утворення застійних зон у місці його розташування з боку дороги, де швидкість повітряного потоку невелика. Таким чином, у цих областях спостерігаються локально високі концентрації хімічного забруднення, що вимагає впровадження додаткових технічних засобів для мінімізації рівня забруднення в цих застійних зонах (локальних відсмоктувачів).

На наступному етапі досліджень виконувалися розрахунки рівня концентрації забруднювача з урахуванням зміни геометрії бар’єра. Як відомо, бар’єри виконуються не тільки вертикальними, тобто перпендикулярними до поверхні землі, а й інших форм, зокрема різної кривизни профілю і нахилу щодо землі. Пропонується зміна форми бар’єрів

за рахунок додаткової горизонтальної складової довжиною 1,25 м на висоті 3,75 м від поверхні землі (рис. 2.12, 2.13).

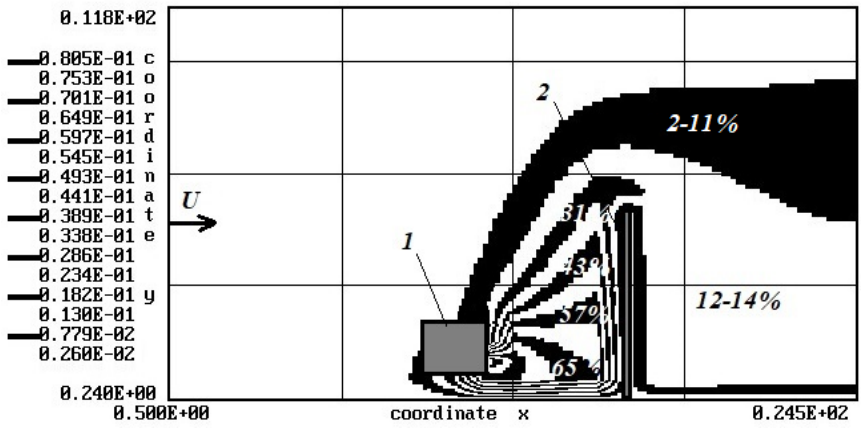


Рисунок 2.12 – Поля концентрації *NO* за наявності вертикального бар'єра висотою *H*=5 м:

1 – одне джерело емісії на третій смузі руху, *2* – екран.

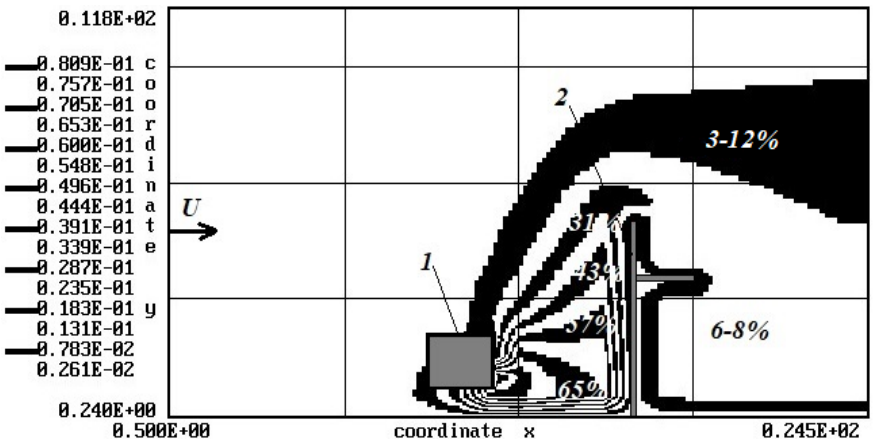


Рисунок 2.13 – Поля концентрації *NO* за наявності вертикального бар'єра з додатковим елементом (висота бар'єра *H*=5 м):

1 – джерело емісії, *2* – бар'єр.

Результати розрахунків показують, що рівень концентрації за бар'єром на висоті органів дихання людини 1,7 м знижується від 14 % до 8 %.

Далі було виконано додаткові, більш поглиблені розрахунки із визначення ефективності використання бар'єра з додатковим елементом. Моделювання виконувалося за такими вихідними даними: розміри розрахункової області 25 м х 12 м; інтенсивність емісії $Q_{NO_x} = 1$ (у безрозмірному вигляді), з яких NO_2 становить 5 % від викиду NO_x, а NO – 95 %; швидкість повітря 5 м/с; ширина області 3 м, висота бар'єра 5 м.

Була збільшена кількість сценаріїв розташування додаткового елемента на бар'єрі. Для більшої наочності нижче наведена розрахункова схема для кожного сценарію:

1. Сценарій 1. Базовий варіант – тільки вертикальний бар'єр, додатковий елемент відсутній (рис. 2.14).

2. Сценарій 2. Вертикальний бар'єр, що має додатковий елемент, який розташований на підвітряному боці бар'єра та має довжину 1 м (сценарій 2) або довжину 2 м (сценарій 2а). Висота установки додаткового елемента 3,5 м (рис. 2.15).

3. Сценарій 3. Вертикальний бар'єр, що має два додаткових елементи: перший розташований на підвітряному боці бар'єра та має довжину 2 м; висота установки цього додаткового елемента 3,5 м. Другий додатковий елемент розташований на навітряному боці бар'єра та має довжину 1 м (короткий елемент, сценарій 3) або 2 м (довгий елемент, сценарій 3а); висота установки цього додаткового елемента 5 м (рис. 2.16).

4. Сценарій 4. Вертикальний бар'єр має додатковий елемент, розташований на підвітряному боці бар'єра під кутом 45^0 та має довжину 2 м. Висота установки додаткового елемента 5 м (рис. 2.17).

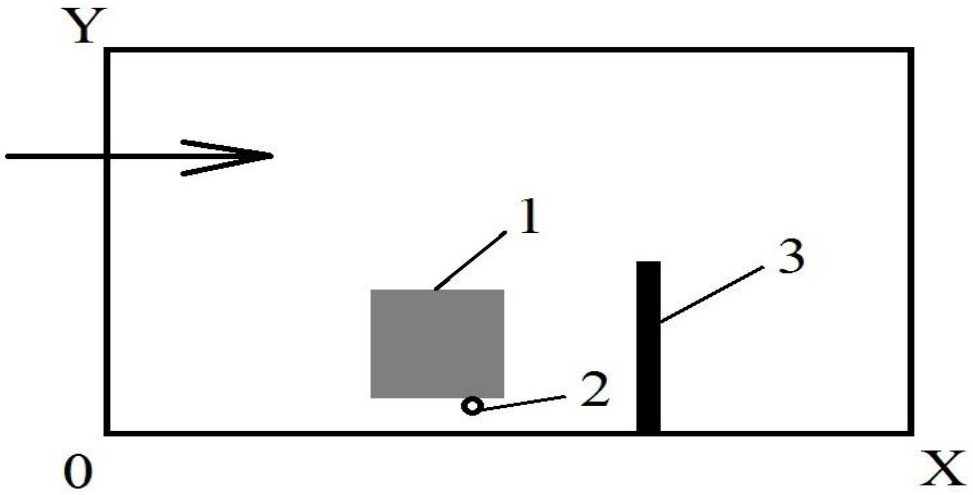


Рисунок 2.14 – Схема розрахункової області (сценарій 1, базовий варіант):
1 – корпус авто; 2 – місце емісії забруднювача; 3 – бар’єр.

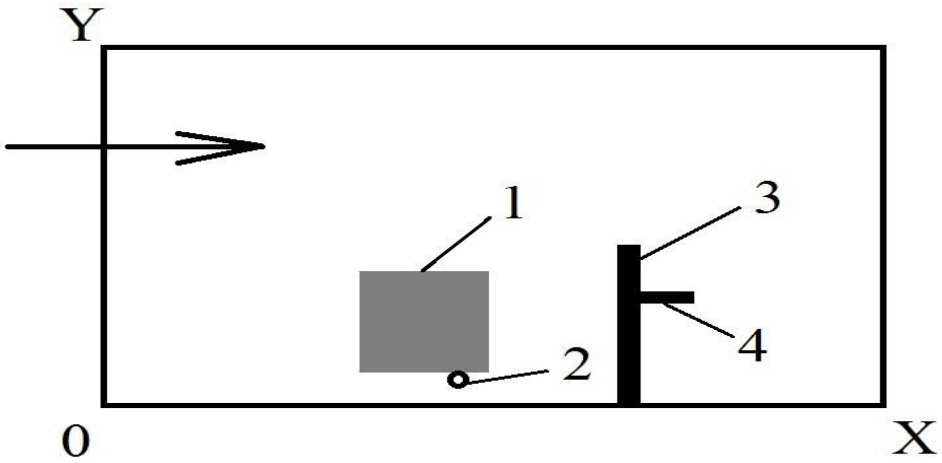


Рисунок 2.15 – Схема розрахункової області (сценарій 2):
1 – корпус авто; 2 – місце емісії забруднювача; 3 – бар’єр; 4 – додатковий елемент.

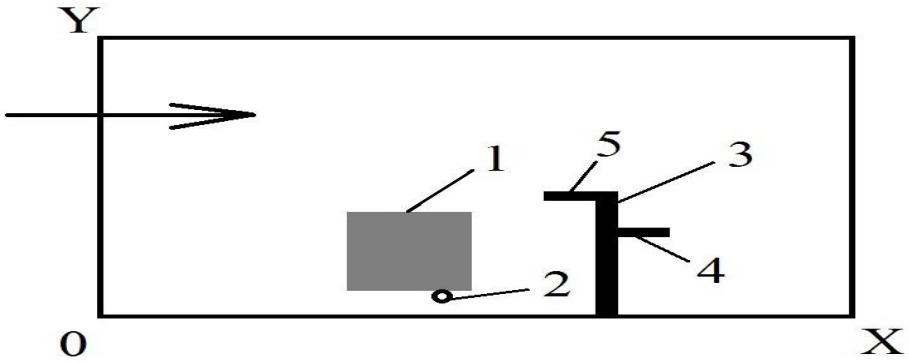


Рисунок 2.16 – Схема розрахункової області (сценарій 3):
1 – корпус авто; *2* – місце емісії забруднювача; 3 – бар'єр;
4, 5 – додаткові елементи.

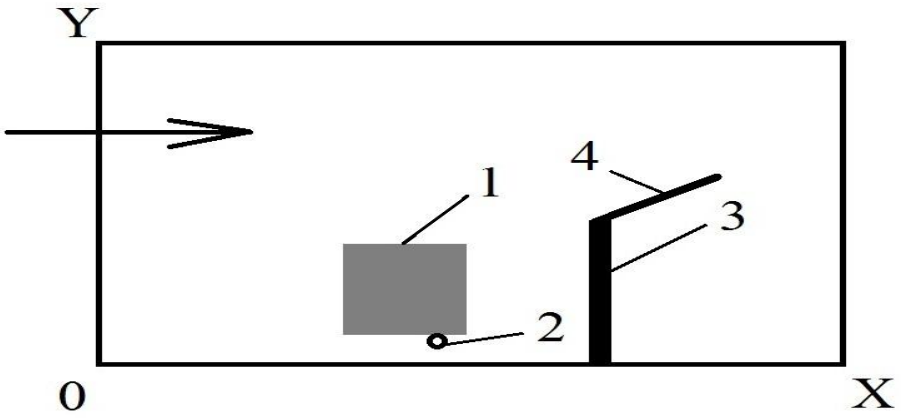


Рисунок 2.17 – Схема розрахункової області (сценарій 4):
1 – корпус авто; *2* – місце емісії забруднювача; *3* – бар'єр;
4 – додатковий елемент.

Нижче, на рисунках, показано зону забруднення для декількох сценаріїв задачі.

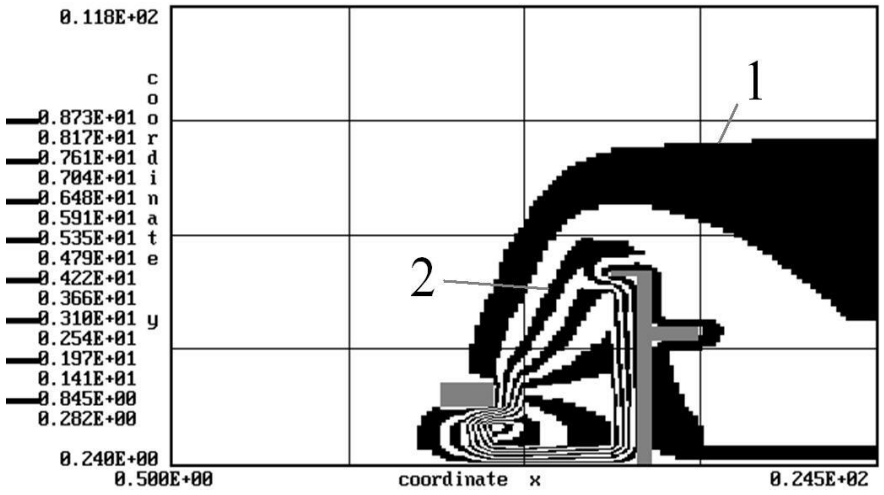


Рисунок 2.18 – Зона забруднення

(концентрація наведена в безрозмірному вигляді, сценарій 3, короткий додатковий елемент на навітряному боці бар'єра):

1 – C=0,08; 2 – C=0,19.

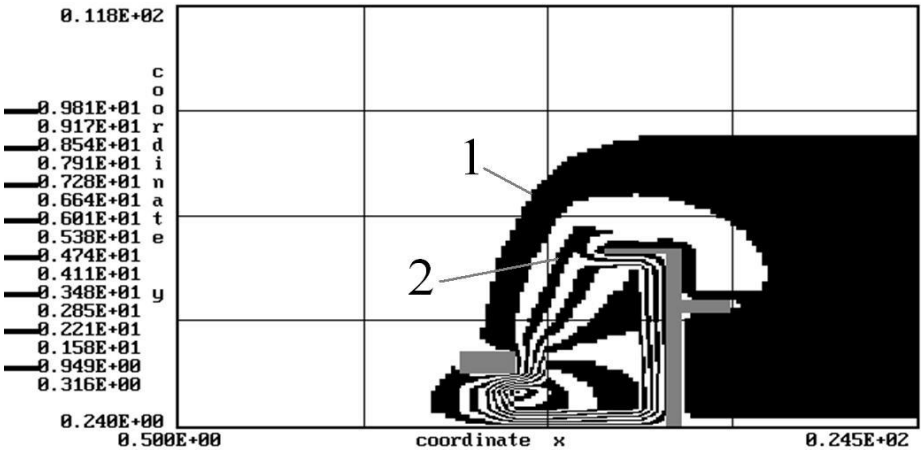


Рисунок 2.19 – Зона забруднення

(концентрація наведена в безрозмірному вигляді, сценарій 3а, довгий додатковий елемент на навітряному боці бар'єра):

1 – C=0,09; 2 – C=0,22.

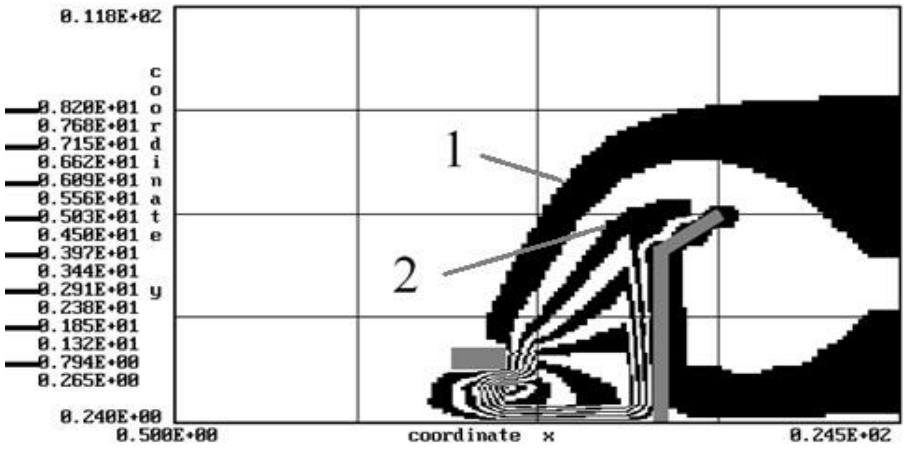


Рисунок 2.20 – Зона забруднення (сценарій 4), концентрація наведена в безрозмірному вигляді:

1 – C=0,07; 2 – C=0,18.

Аналіз даних рисунків показує, що додаткові елементи на бар'єрі впливають на форму області забруднення, а значить – на інтенсивність забруднення робочої зони. Для оцінки цього впливу в табл. 2.2 наведено безрозмірне значення концентрації *NO* в точці, що розташована на висоті 1,6 м та довжині 3 м від бар'єра, на підвітряному боці.

Таблиця 2.2 – Концентрації *NO* в робочій зоні

Сценарій	Сценарій 1, базовий	Сценарій 2	Сценарій 2а	Сценарій 3	Сценарій 3а	Сценарій 4
Концентрація *NO (безрозмірна)*	$9.9 \cdot 10^{-3}$	$9.5 \cdot 10^{-3}$	$9.1 \cdot 10^{-3}$	$8.6 \cdot 10^{-3}$	$7.9 \cdot 10^{-3}$	$7.8 \cdot 10^{-3}$

Аналіз даних із цієї таблиці показує, що найбільш прийнятним варіантом є сценарій 3а та сценарій 4.

Також слід звернути увагу на таке. Відомо, що за наявності перешкод у розрахунковій області формуються зони, де лінії струму мають велику кривизну. За таких умов деякі чисельні моделі втрачають свою стійкість, що обмежує їх практичне використання, оскільки в реальних умовах існує

велика кількість комбінацій розташування «автодороги й екрана». Отримані результати свідчать про те, що побудована чисельна модель має великий запас стійкості й може бути застосована для розрахунку зон забруднення в областях з різною геометрією бар'єрів.

Таким чином, побудована чисельна модель дозволяє оцінювати зони хімічного забруднення, що формуються біля захисних бар'єрів, та виділити підзони, де таке забруднення є найбільш інтенсивним. Виявлення таких підзон дозволяє рекомендувати заходи захисту щодо мінімізації рівня забруднення, наприклад, за рахунок зміни висоти екрана. З отриманого розподілу полів концентрації *NO* видно, що збільшення висоти екранів приводить до зниження інтенсивності забруднення в області можливого місця розташування працівників.

Далі наведено результати фізичного експерименту та результати обчислювального експерименту з дослідження ефективності використання бар'єра з додатковим елементом, що має ухил «по потоку» (рис. 2.21). Модель автомобіля мала розміри: довжина $L = 21$ см, середня висота 10 см, ширина 8 см. Висота бар'єра 10 см, довжина додаткового елемента 4 см, кут ухилу 45^0. Довжина від джерела емісії до бар'єра 12 см. У ході обчислювального експерименту модель автомобіля зображувалася «прямокутником» розміром 8 см х10 см. Для створення джерела емісії здійснювалося паління «ароматизованих паличок», що створюють дим, який можливо зафіксувати на фотокамеру. Ці палички розташовувалися в нижній частині моделі авто на висоті 3 см. Для вимірювання концентрації *CO* використовувався газоаналізатор GD-3301. Для створення потоку повітря використовувалася повітродувка. Швидкість повітряного потоку визначалася за допомогою приладу GM 8908. Замір концентрації *CO* здійснювався на висоті 14 см. Концентрація *CO* біля джерела емісії *Co*= 174 – 187 ppm (у розрахунку приймалося 185 ppm).

Лабораторні експерименти виконувалися при температурі повітря 21 ^{0}C. Як критерій подібності використовувалося число Рейнольдса, а при

розрахунку числа Рейнольдса як масштаб використовувалася довжина автомобіля L, швидкість повітряного потоку V =140 см/с – 160 см/с, коефіцієнт кінематичної в'язкості ν при температурі 21^0C ($\nu = 15.06 \cdot 10^{-6}$ м^2/с). Значення числа Рейнольдса розраховувалося так:

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot L}{\nu}.$$

На рис. 2.21 показана зона забруднення, отримана в ході експерименту.

Рисунок 2.21 – Зона забруднення:
1 – джерело викиду; 2 – зона забруднення перед бар'єром; 3 – зона забруднення над додатковим елементом.

Аналізуючи рис. 2.21, можна виявити закономірності формування зони забруднення повітря при використанні бар'єра, що має ухил «по потоку». А саме: біля верхньої частини бар'єра формується область з досить високою концентрацію домішки, на що вказує «щільність» диму (область 2, рис. 2.21). Ця область формується внаслідок того, що вертикальна частина бар'єра відіграє роль перешкоди на шляху поширення домішки. Додатковий елемент, що має ухил, зверху створює «трамплін» для додаткового вертикального руху домішки. Внаслідок цього над цим елементом формується додаткова

область забруднення. Рух забрудненого повітря вгору сприяє зменшенню рівня забруднення повітря за бар'єром. Таким чином, зі зміною аеродинаміки потоку біля цього бар'єра зменшується рівень забруднення робочих зон за бар'єром.

Нижче, у табл. 2.3 наведено значення концентрації *CO* за бар'єром, що отримане експериментальним шляхом. Зауважимо, що точці «*X=0*» відповідає замір над бар'єром. У таблиці також наведені дані розрахунку на базі розробленої чисельної моделі.

Таблиця 2.3 – Концентрації *CO* біля бар'єра, ppm

X, см	Експеримент	Розрахунок
0	12 – 15	11
4	8 – 11	6
8	4 – 6	3

Аналізуючи дані в таблиці, можна зробити висновок, що маємо задовільне узгодження експериментальних та розрахункових даних.

Далі на базі чисельної моделі була розв'язана така задача. Розглядається викид *CO* (Q=10 мг/с) від автомобіля на автотрасі, поруч з якою розташовано захисний бар'єр, що має Г-подібну форму. Швидкість повітряного потоку 1.7 м/с, висота бар'єра 5 м.

Досліджується ефективність зменшення рівня забруднення повітря біля автотраси за таких сценаріїв:

1. Бар'єр має Г-подібну форму (сценарій 1, рис. 2.22, довжина верхньої частини 2 м).

2. Бар'єр має Г-подібну форму, але додатково над автотрасою є екран (сценарій 2, рис. 2.23, довжина екрана 1.5 м).

3. Бар'єр має Г-подібну форму, але на цьому бар'єрі є додатковий елемент, що має ухил (сценарій 3, рис. 2.24, довжина «ухилу» 1 м).

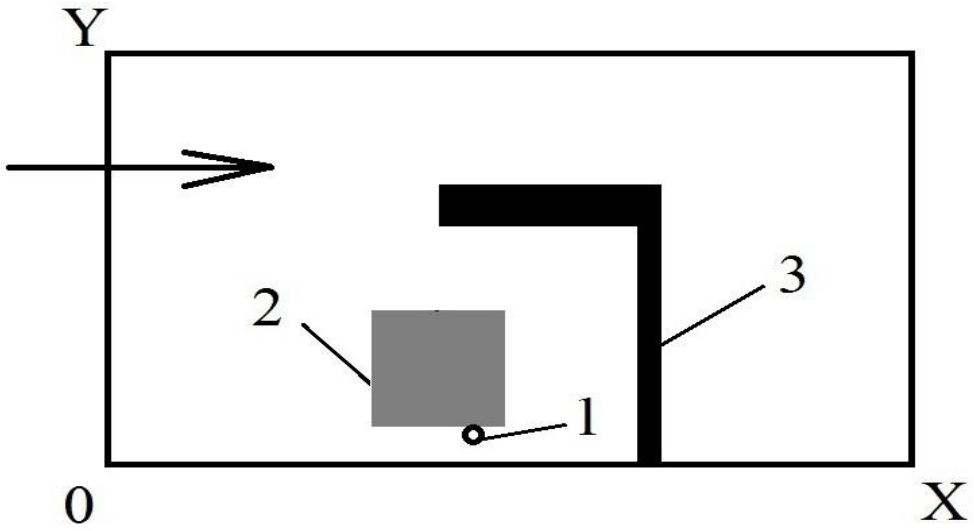


Рисунок 2.22 – Розрахункова схема, сценарій 1:
1 – місце викиду забруднювача; 2 – корпус автомобіля; 3 – бар’єр.

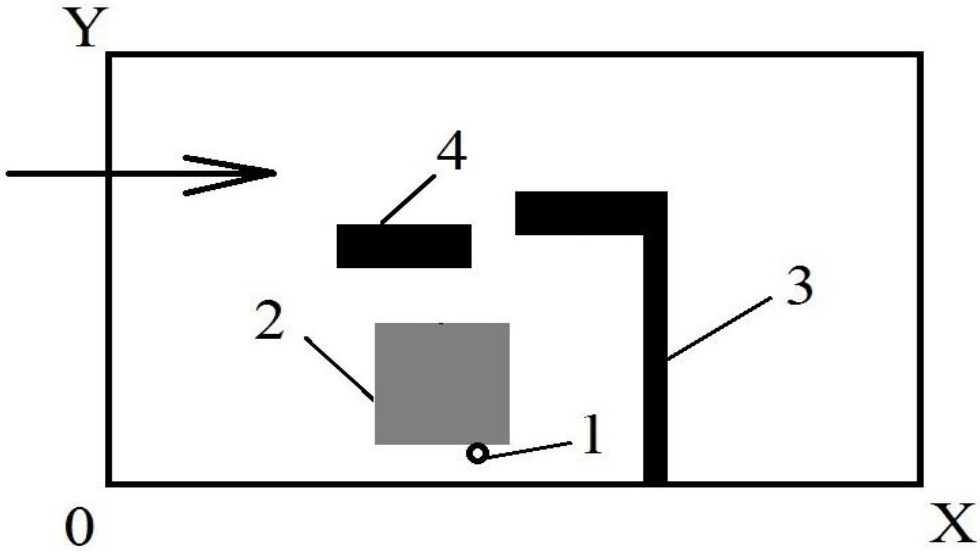


Рисунок 2.23 – Розрахункова схема, сценарій 2:
1 – місце викиду забруднювача; 2 – корпус автомобіля; 3 – бар’єр; 4 – екран.

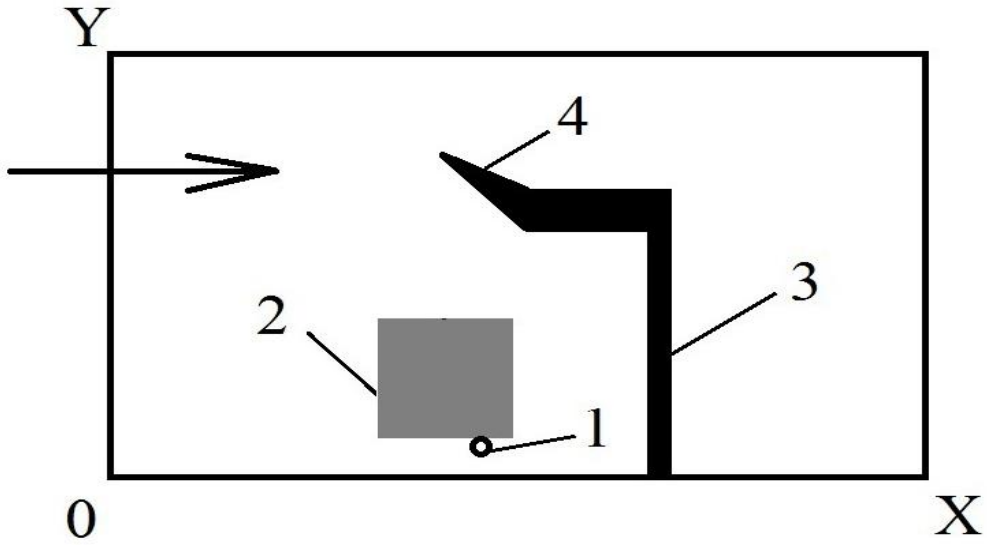


Рисунок 2.24 – Розрахункова схема, сценарій 3:
1 – місце викиду забруднювача; 2 – корпус автомобіля; 3 – бар’єр; 4 – екран.

Далі на рисунках показано розподіл концентрації *CO* в розрахунковій області. На цих рисунках кожне число показує концентрацію у відсотках від максимального її значення C_{max} у розрахунковій області. Максимальне значення концентрації (на рисунках йому відповідає число «99») маємо на місці викиду домішки, під автомобілем. Друк чисел здійснено у форматі «Integer», тобто без урахування дрібної частини числа.

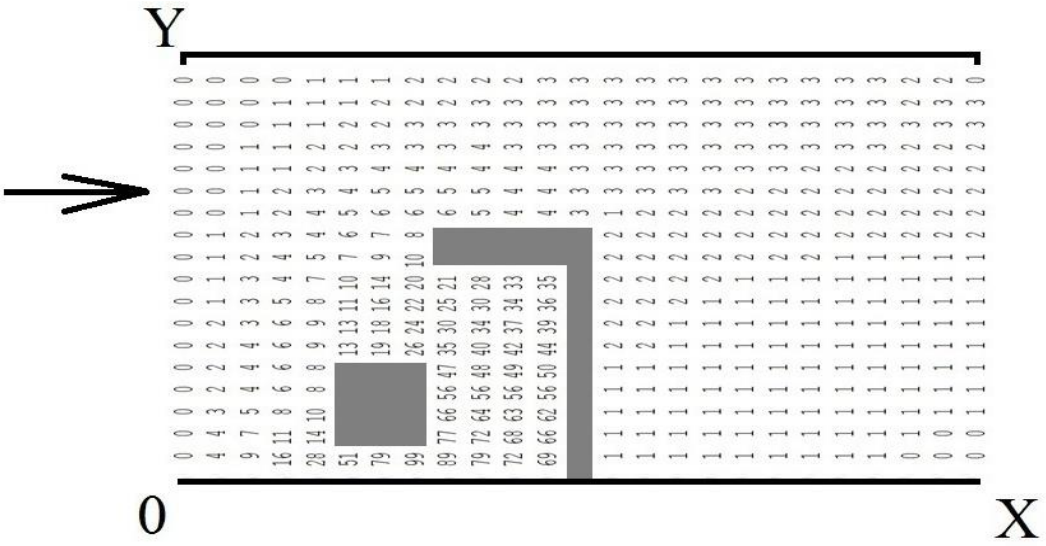


Рисунок 2.25 – Розподіл концентрації домішки, C_{max}=10,15 мг/м^3, сценарій 1

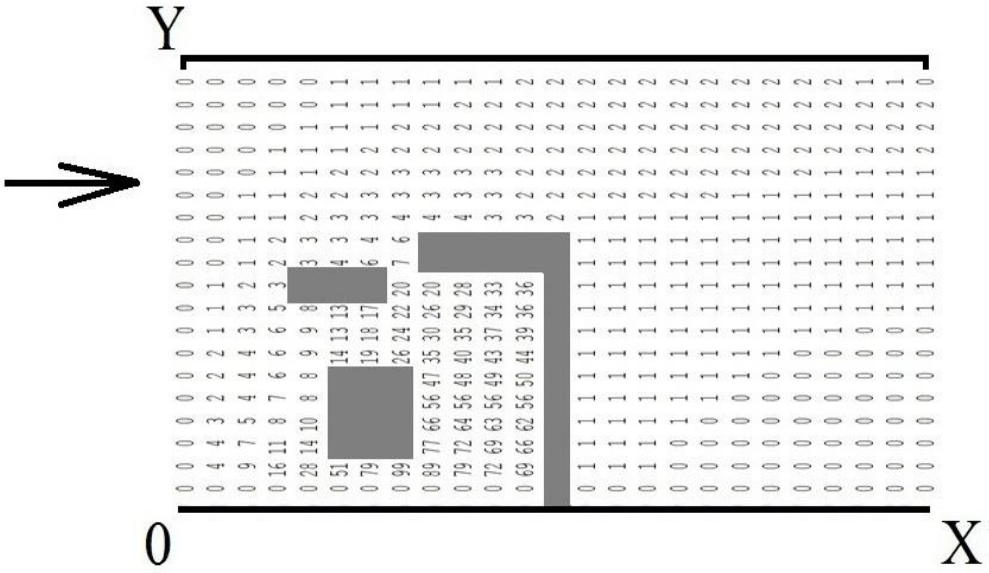


Рисунок 2.26 – Розподіл концентрації домішки, C_{max} =10,12 мг/м^3, сценарій 2

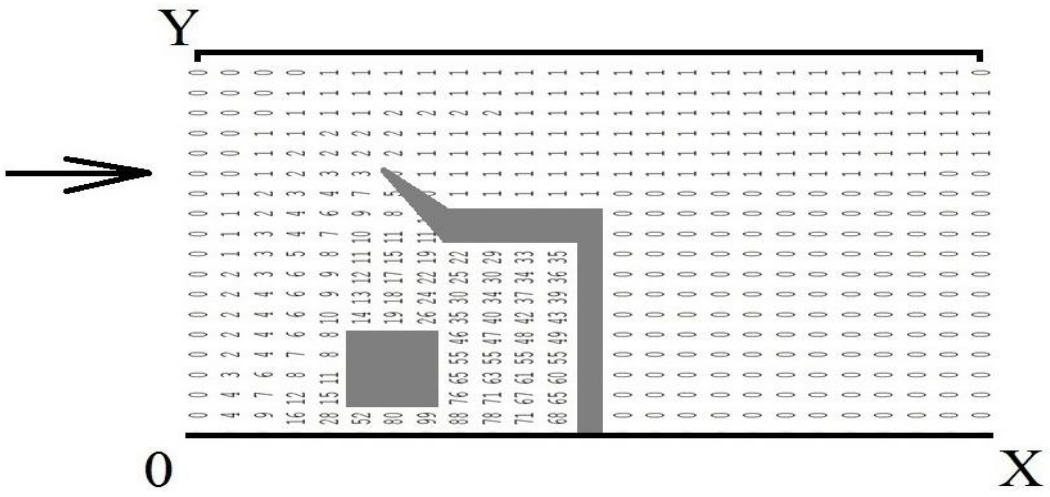


Рисунок 2.27 – Розподіл концентрації домішки, C_{max}=10,38 мг/м^3, сценарій 3

На рис. 2.28 показано розподіл концентрації домішки за бар'єром на рівні 1.7 м.

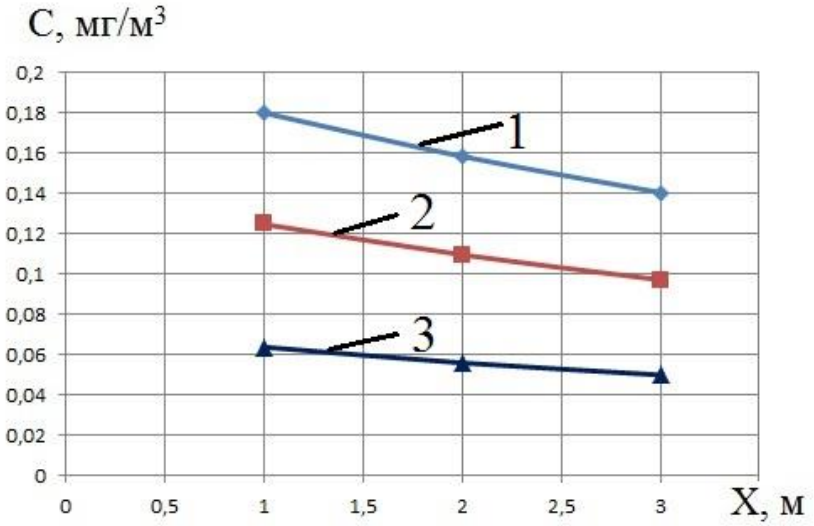


Рисунок 2.28 – Розподіл концентрації домішки за бар'єром:
1 – сценарій 1; 2 – сценарій 2; 3 – сценарій 3.

Як можна переконатися з рис. 2.28, у разі використання сценарію 3 спостерігається найбільш ефективне зменшення концентрації домішки за

бар'єром. Так, у робочий зоні на відстані 3 м від бар'єра концентрація домішки для цього сценарію майже в 3 рази нижча, ніж для сценарію 1.

Наголосимо, що час розрахунку одного сценарію становить 7 с.

Далі була побудована інша чисельна модель. Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу здійснюється його розщеплення на диференціальному рівні (тут та нижче концентрація домішки позначається як *C*).

Розщеплення має вигляд [109]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}=0$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial vC}{\partial y}=0, \qquad (2.19)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)=0, \qquad (2.20)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\sum Q_i(t)\delta\left(x-x_i(t)\right)\delta\left(y-y_i(t)\right). \qquad (2.21)$$

Для чисельного інтегрування перших трьох рівнянь використовується метод МакКормака [99]. Згідно із цим методом, розрахункові різницеві рівняння мають вигляд:

- етап – предиктор:

$$C_{i,j}^{n+a}=C_{i,j}^{n+a}-u_{i,j}\left(\frac{C_{i+1,j}^{n}-C_{i,j}^{n}}{\Delta t}\right),$$

$$C_{i,j}^{n+a}=C_{i,j}^{n+a}-v_{i,j}\left(\frac{C_{i,j+1}^{n}-C_{i,j}^{n}}{\Delta t}\right),$$

- етап – коректор:

$$C_{i,j}^{n+1} = C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}\left(\frac{C_{i,j}^{n+a} - C_{i-1,j}^{n+a}}{\Delta t}\right),$$

$$C_{i,j}^{n+1} = C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}\left(\frac{C_{i,j}^{n+a} - C_{i,j-1}^{n+a}}{\Delta t}\right),$$

де $C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = \left(\frac{C_{i,j,k}^{n+a} + C_{i,j,k}^{n}}{\Delta t}\right).$

Таким чином, визначення зміни концентрації домішки за рахунок дії вітру здійснюється на базі послідовного використання наведених розрахункових залежностей.

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії використовується метод сумарної апроксимації [100]. Різницеві залежності містять два кроки та мають вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2}\right] + \left[\mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2}\right],$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}\right] + \left[\mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}\right].$$

На кожному кроці невідоме значення концентрації домішки визначається за допомогою методу біжучого рахунку, тобто за явною формулою.

Для розв’язання рівняння (2.21) використовується метод Ейлера [100]

$$C_{ij}^{n+1} = C_{ij}^{n} + \Delta t \sum Q_i \delta\left(x - x_i\right) \cdot \delta\left(y - y_i\right) / \Delta x / \Delta y.$$

Здійснено кодування побудованої чисельної моделі та розроблено код Area-2A.

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості здійснюється його запис у вигляді нестаціонарного рівняння:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \tag{2.22}$$

де t – фіктивний час.

На наступному кроці здійснюється геометричне розщеплення рівняння (2.22) таким чином [100]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \tag{2.23}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \tag{2.24}$$

Далі для визначення невідомого значення P на базі рівняння (2.23) використовується така залежність [99]:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \Delta t \frac{P_{i+1,j}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2}.$$

Для визначення невідомого значення P на базі рівняння (2.24) застосовується залежність

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \Delta t \frac{P_{i,j+1}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}.$$

Розрахунок закінчується, коли виконується умова

$$\left|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n}\right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число;

n – номер ітерації.

Після розрахунку поля потенціалу швидкості визначаються компоненти вектора швидкості повітряного потоку на базі таких залежностей:

$$u = \frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{\Delta x}, \quad v = \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j}}{\Delta y}.$$

На базі цієї чисельної моделі створено код SCREEN-2B, мова програмування – FORTRAN.

На базі створеної чисельної моделі здійснено оцінювання ефективності використання захисного бар’єра, що має складну Т-подібну форму. Відомо, що такі бар’єри використовуються у Євросоюзі (рис. 2.29). Нижче наведено результати розв’язку модельної задачі. Розглядається викид *NO* на автотрасі, поруч з якою розташовано захисний бар’єр, що має складну Т-подібну форму. Досліджується ефективність зменшення рівня забруднення повітря біля автотраси в разі використання одного (рис. 2.30) та двох бар’єрів (рис. 2.31). Швидкість повітря 1.7 м/с. Висота бар’єра 5 м, довжина верхньої горизонтальної частини бар’єра 2 м.

Рисунок 2.29 – Бар’єр, що має Т-подібну форму [6]

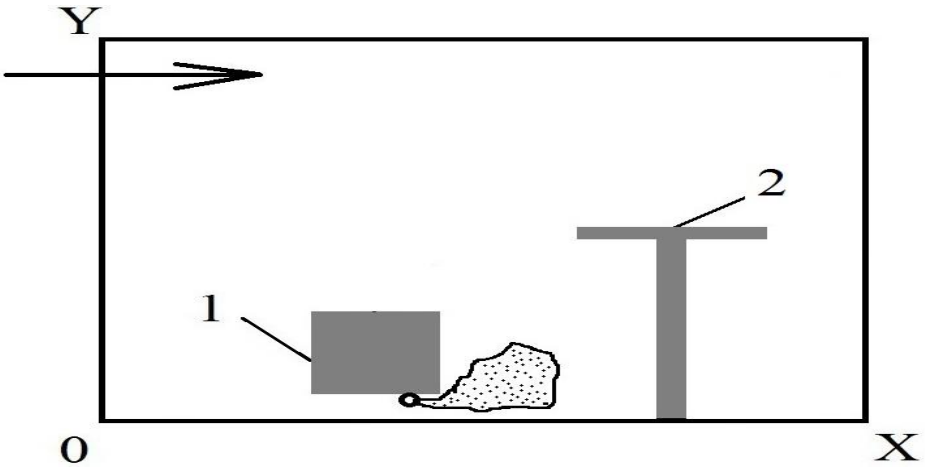


Рисунок 2.30 – Розрахункова схема, сценарій 1:
1 – місце викиду забруднювача; 2 – бар’єр.

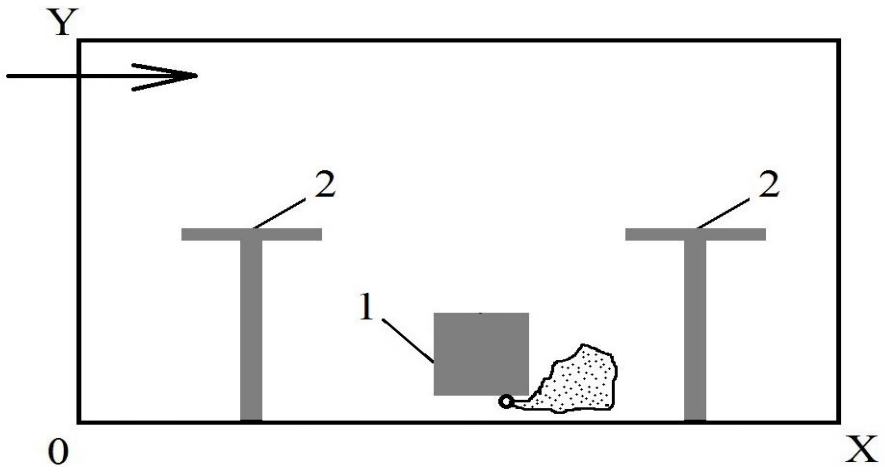


Рисунок 2.31 – Розрахункова схема, сценарій 2:
1 – місце викиду забруднювача; 2 – бар’єр.

Поле безрозмірної концентрації *NO* в області дослідження показано на рис. 2.32, 2.33. Кожне число показує концентрацію у відсотках від максимального її значення в області дослідження. Це максимальне значення (цьому значенню відповідає число 99) розташоване під автомобілем (вихлопна труба). Усі числа надруковані в форматі «Integer», тобто без урахування дрібної частини числа.

Рисунок 2.32 – Розподіл безрозмірного значення концентрації, сценарій 1

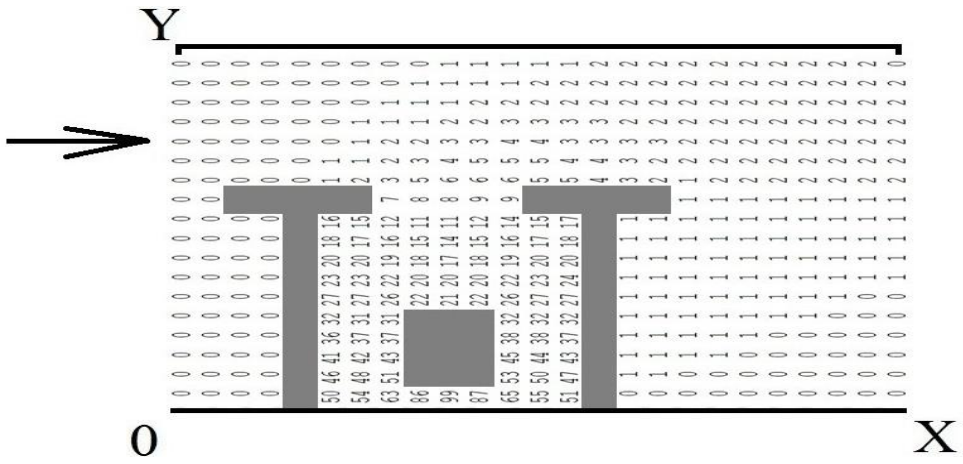


Рис. 2.33 – Розподіл безрозмірного значення концентрації, сценарій 2

Як можна бачити з наведених рисунків, у разі використання двох бар'єрів зона забруднення формується як для конфігурації типу «вуличний каньйон». Біля бар'єра формується зона з великим градієнтом концентрації домішки. Концентрація забруднюючої речовини зменшується з висотою. Концентрація домішки над бар'єром становить близько 5 % від максимальної концентрації.

На рис. 2.34 показано розподіл безрозмірної концентрації домішки за правим бар'єром на рівні 1.7 м (положення органів дихання людини).

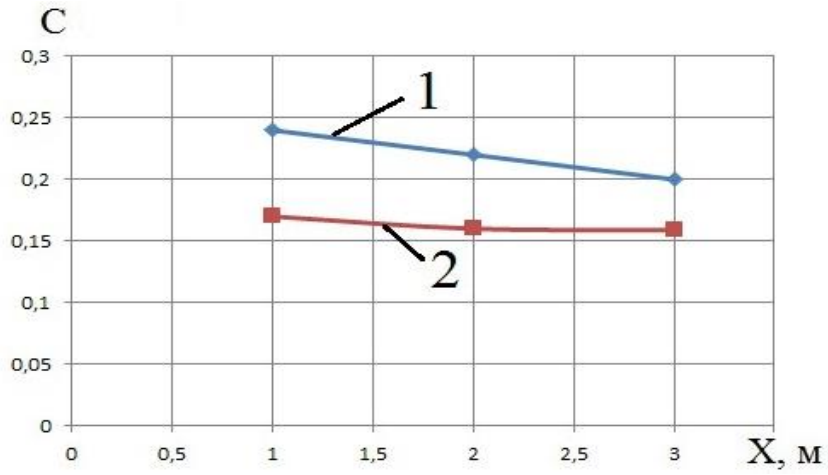


Рисунок 2.34 – Розподіл безрозмірної концентрації домішки за бар'єром:
1 – сценарій 1; 2 – сценарій 2.

Як можна бачити з рис. 2.32, у разі використання сценарію 2 спостерігається найбільш ефективне зменшення концентрації домішки в робочій зоні за бар'єром, оскільки в цьому випадку наявне поширення домішки від автомобіля за схемою «каньйон», тобто в замкнутому просторі, коли лише мала частина забруднювача залишає «каньйон».

На наступному етапі досліджень було виконано фізичний експеримент для розв'язання таких задач:

1. Визначення закономірностей формування зони забруднення повітря в разі використання бар'єра, що має Т-подібну форму.

2. Верифікація розробленої чисельної моделі, що створена для прогнозування ефективності використання бар'єра, що має Т-подібну форму.

Для виконання фізичного експерименту використовувалася схема, що показана на рис.2.30, тобто модель автомобіля (вантажного) + один бар'єр, що має Т-подібну форму.

Для створення джерела емісії здійснювалося паління «ароматизованих паличок», що створюють дим, який можливо зафіксувати на фотокамеру. Ці палички розташовувалися в нижній частині моделі авто. Для вимірювання концентрації *CO* використовувався газоаналізатор GD-3301. Для створення потоку повітря застосовувалася повітродувка. Швидкість повітряного потоку визначалася за допомогою приладу GM 8908.

Експеримент виконували за таких параметрів: довжина моделі авто *L*=46 см, ширина 8 см, середня висота моделі 11 см; швидкість потоку 0,9–1,2 м/с (у розрахунку приймалося 1 м/с); висота джерела викиду домішки 3 см; довжина від моделі авто до бар'єра 15 см; висота бар'єра 10 см, довжина горизонтальної пластини на бар'єрі 10 см; температура повітря 21 ^{0}С. Замір концентрації *CO* здійснювався на висоті 12 см. Концентрація *CO* біля джерела емісії *Co*= 82- 90 ppm (у розрахунку приймалося 86 ppm). Як критерій подібності використовувалося число Рейнольдса. При розрахунку числа Рейнольдса як масштаб використовувалася довжина моделі авто L, швидкість повітряного потоку V =1 м/с, коефіцієнт кінематичної в'язкості ν

при температурі 21 ^{0}C ($\nu = 15.06 \cdot 10^{-6}$ м^2/с). Значення числа Рейнольдса розраховувалося таким чином:

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot L}{\nu}.$$

Наявність гострих кромок на моделі авто та бар'єрі було причиною формування відриву вихорів та появи турбулентного режиму течії. На рис. 2.35 можна чітко бачити вихори в області дослідження.

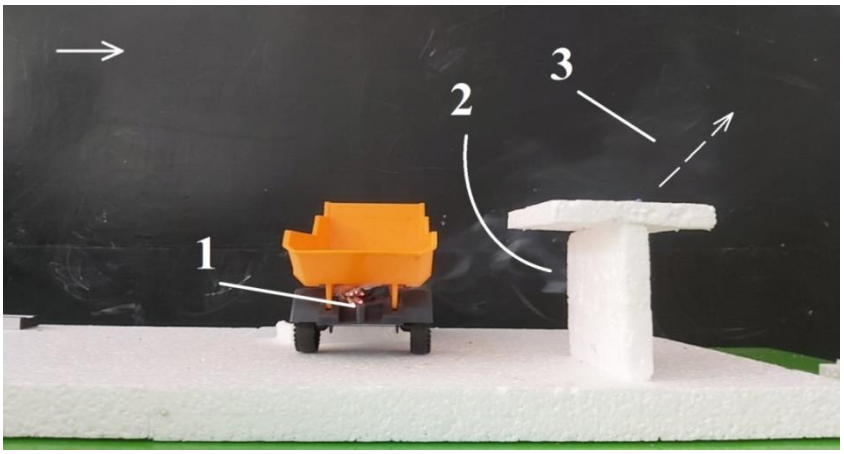


Рисунок 2.35 – Зона забруднення біля захисного бар'єра, *t*= 12 с:
1 – місце викиду забруднювача; 2 – область забруднення під пластиною; 3 – область забруднення над пластиною.

Аналізуючи рис. 2.35, можна виявити закономірності формування зони забруднення повітря в разі використання бар'єра, що має Т-подібну форму. Зокрема, біля бар'єра під горизонтальною пластиною формується область з досить високою концентрацію домішки, на що вказує «густина» диму (область 2, рис. 2.35). Ця область формується внаслідок того, що вертикальна частина бар'єра відіграє роль перешкоди на шляху горизонтального поширення домішки, а додаткова пластина зверху створює перешкоду для вертикального руху домішки вдовж бар'єра. Тому потік забрудненого

повітря здійснює розворот біля краю горизонтальної пластини та починає рухатися вгору. Внаслідок цього над пластиною формується додаткова область забруднення (область 3, рис. 2.35). Густина диму в цій області менша, ніж у перший області. Важливо побачити рух забрудненого повітря угору, що показано дотичною стрілкою на рис. 2.35. Такий рух сприяє зменшенню рівня забруднення повітря за бар'єром. Таким чином, зі зміною аеродинаміки потоку біля цього бар'єра зменшується рівень забруднення робочих зон за бар'єром.

Нижче в табл. 2.4 наведено дані експериментального виміру концентрації *CO* на різній відстані від бар'єра (вимір на висоті 12 см, початок виміру *x=0* – лівий край горизонтальної пластини). У таблиці також наведено дані, що отримані розрахунковим шляхом на базі розробленої чисельної моделі.

Таблиця 2.4 – Значення концентрації *CO,* ppm

x, см	Експеримент	Розрахунок
0	7 – 9	5.83
4	4 – 5	4.21
8	2 – 4	2.64
12	1 – 2	1.04

Аналізуючи дані в таблиці, можна зробити висновок, що маємо задовільне узгодження експериментальних та розрахункових даних.

Далі розглядається розв'язок іншого класу задач. Відомо, що досить часто транспортування вугілля здійснюється в умовах складного рельєфу (насип тощо, рис. 2.36). Тому на базі розробленої чисельної моделі була розв'язана задача, що ілюструє можливість її використання для оцінювання ефективності захисних бар'єрів в умовах складного рельєфу.

Рисунок 2.36 – Перевезення вугілля автотранспортом в умовах складного рельєфу
(фото: https://www.epravda.com.ua/news/2021/12/13/680620/)

Розглядається викид *NO* на автотрасі, що розташована у виїмці (рис. 2.37). Досліджується вплив захисних бар'єрів на зниження рівня забруднення атмосферного повітря. При проведенні розрахунків швидкість повітряного потоку приймалася 1.7 м/с; коефіцієнти турбулентної дифузії 1.7 м^2/с. Розглядаються такі сценарії:

1. Викид на автотрасі за відсутності бар'єра (сценарій 1, рис. 2.37).
2. Використовується захисний бар'єр прямокутної форми, розташований на верхній частини виїмки; висота бар'єра 2.3 м (сценарій 2, рис. 2.38).
3. Використовується захисний бар'єр прямокутної форми, розташований у нижній частині виїмки (висота бар'єра 2 м), біля автотраси, а у верхній частини виїмки є бар'єр, що має Г-подібну форму, висота бар'єра 2.3 м, довжина горизонтальної частини бар'єра 1 м (сценарій 3, рис. 2.39).

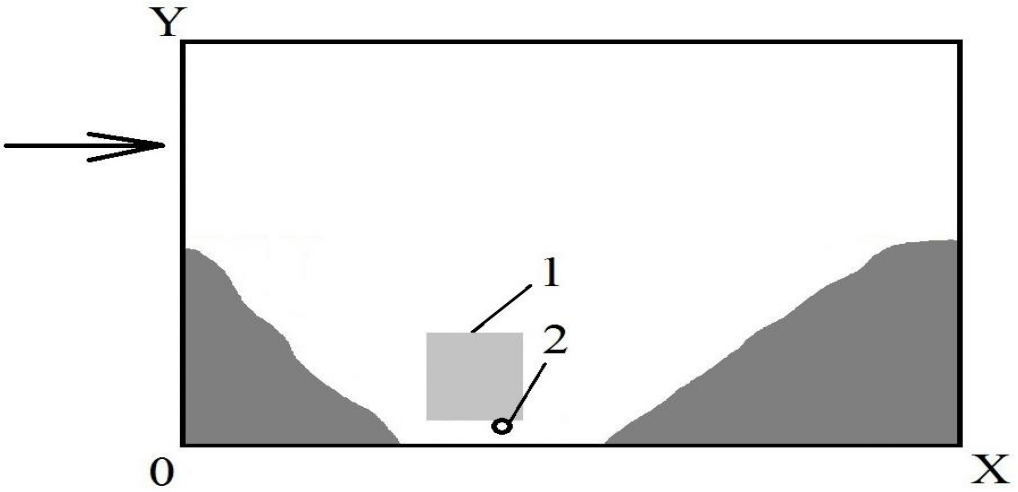


Рисунок 2.37 – Розрахункова схема, сценарій 1:
1 – корпус автомобіля; 2 – місце викиду домішки.

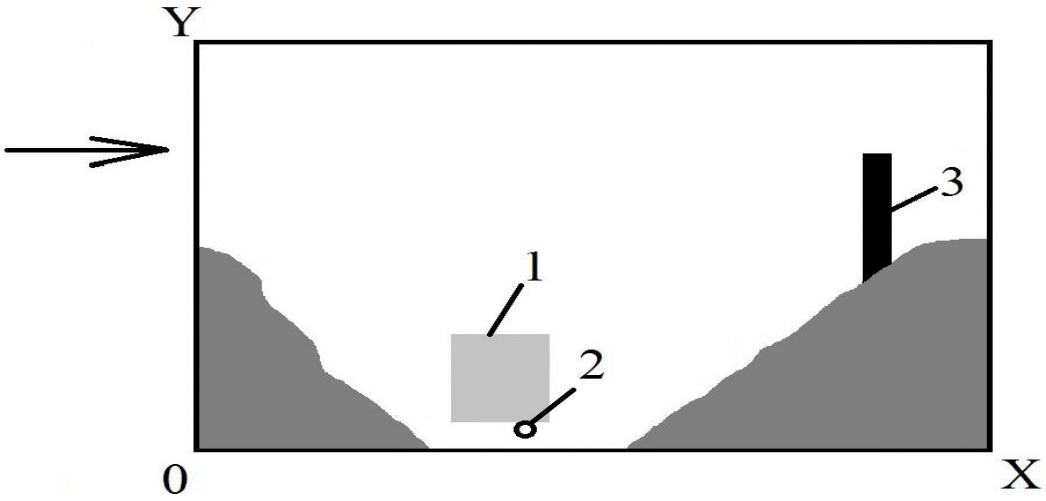


Рисунок 2.38 – Розрахункова схема, сценарій 2:
1 – корпус автомобіля; 2 – місце викиду домішки; 3 – бар’єр.

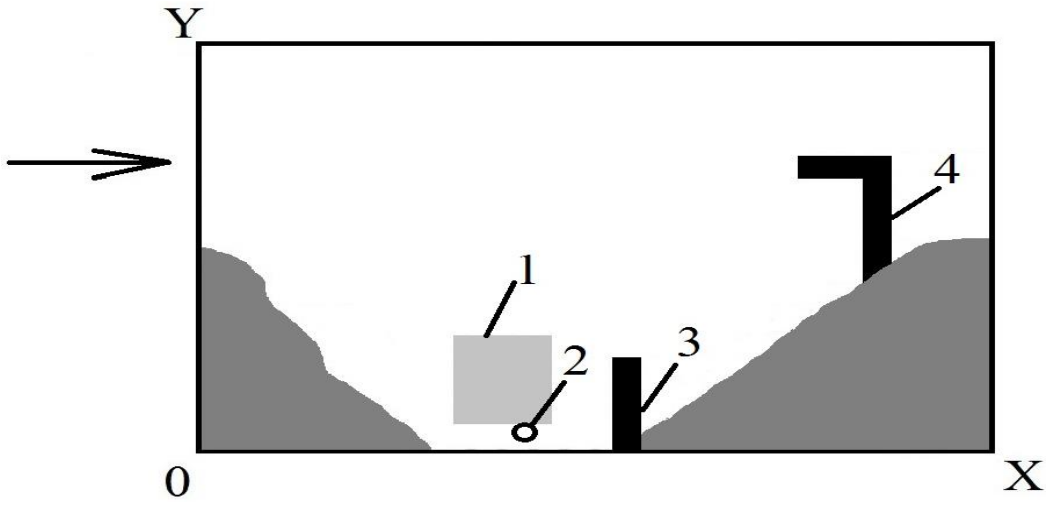


Рисунок 2.39 – Розрахункова схема, сценарій 3:
1 – корпус автомобіля; 2 – місце викиду домішки; 3,4 – бар'єри.

Далі показано поле концентрації *NO* у розрахунковій області. Кожне число показує концентрацію у відсотках від максимального її значення в розрахунковій області. Цьому значенню концентрації відповідає число 99. Друк чисел здійснено в форматі «Integer», тобто без урахування дрібної частини числа.

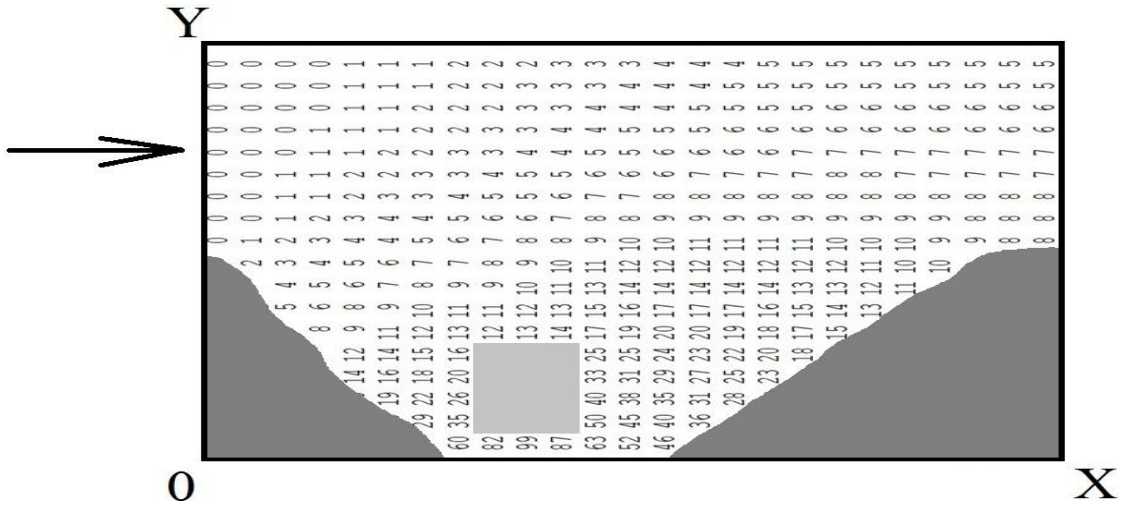


Рисунок 2.40 – Розподіл безрозмірного значення концентрації, сценарій 1

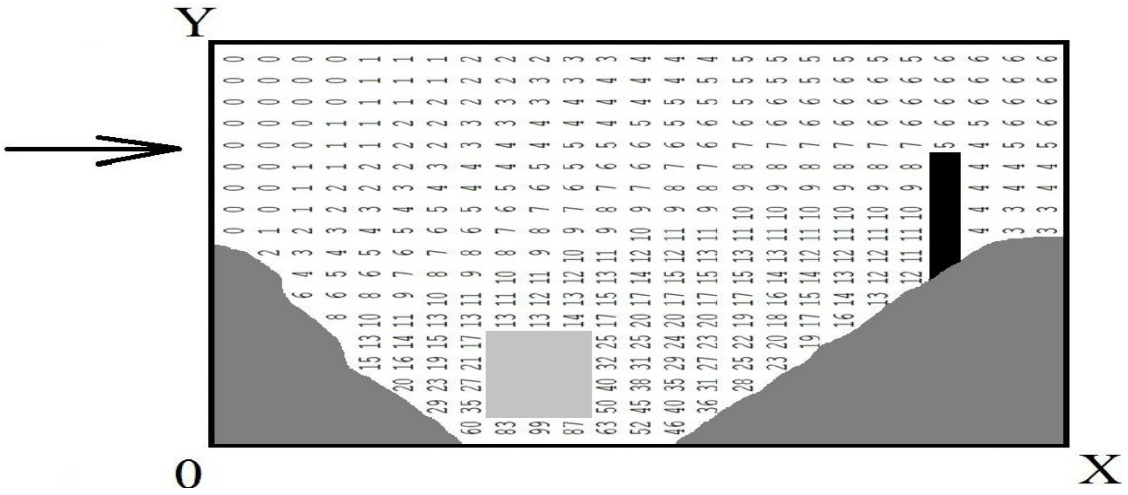


Рисунок 2.41 – Розподіл безрозмірного значення концентрації, сценарій 2

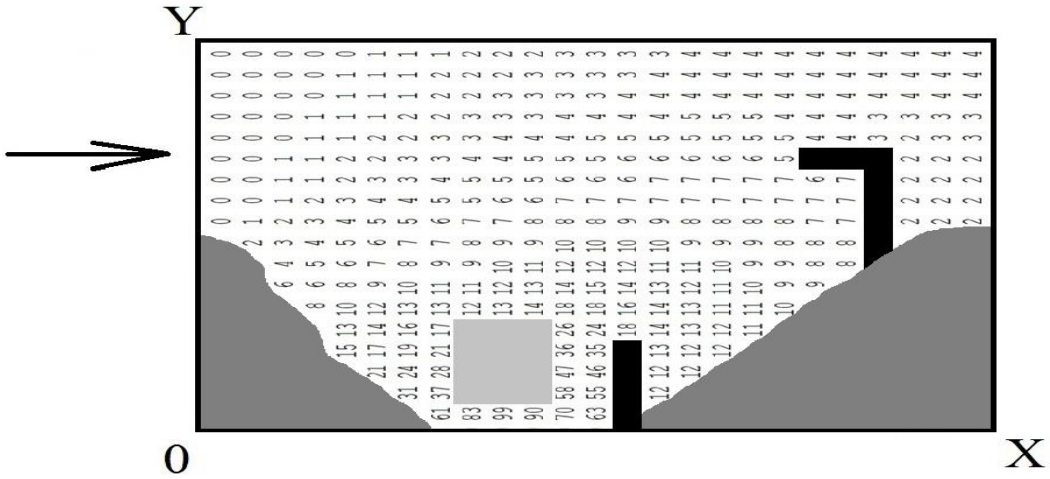


Рисунок 2.42 – Розподіл безрозмірного значення концентрації, сценарій 3

У табл. 2.5 показано безрозмірне значення концентрації домішки в точці, що розташована на висоті 1.7 м на виході з виїмки.

З табл. 2.5 можна бачити, що ефективне зменшення концентрації забруднюючої речовини спостерігається в разі використання сценарію 3: концентрація більш ніж вдвічі зменшується порівняно зі сценарієм, коли захисні бар’єри відсутні. Таким чином, за допомогою розробленої моделі є можливість визначити раціональне розташування захисних бар’єрів для зменшення рівня забруднення повітряного середовища.

Таблиця 2.5 – Безрозмірне значення концентрації домішки на виході з виїмки

Сценарій	Значення концентрації
Сценарій 1	1,01
Сценарій 2	0,54
Сценарій 3	0,37

Зауважимо, що час розрахунку одного сценарію становить 15 с.

Далі була розв’язана задача з визначення ефективності бар’єрів, що розташовані біля насипу (рис. 2.43).

У розглянутій розрахунковій області, яка має складний рельєф, розташовуються дві автодороги з діючим автотранспортом, додатково по узбіччю автодороги передбачається розміщення захисних екранів. Ставиться задача розрахунку зони забруднення атмосферного повітря при емісії забруднюючих речовин від автотранспорту (NO , NO_2).

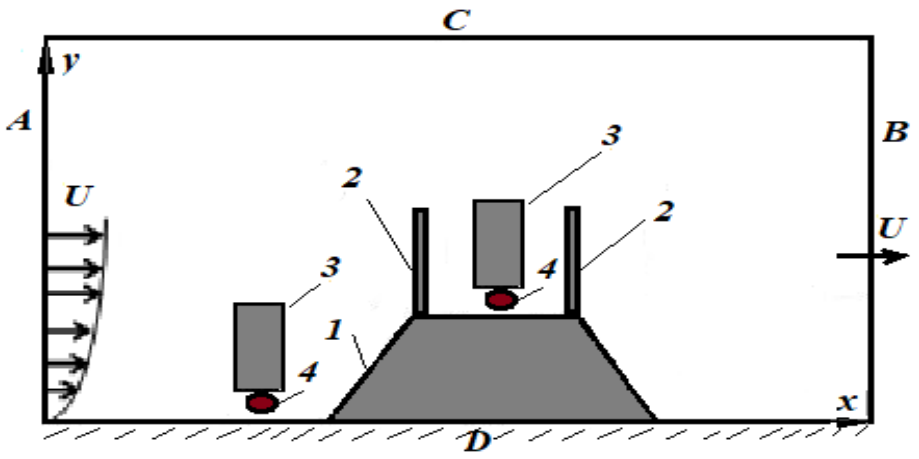


Рисунок 2.43 – Схема розрахункової області:
1 – насип, *2* – екрани, *3* – автомобіль, *4* – джерело емісії (вихлопна труба автомобіля); *A, B, C, D* – межі розрахункової області.

Розроблений метод прогнозування був використаний для розв’язання

задачі з оцінювання рівня забруднення біля автодороги за наявності джерела емісії – автотранспорту, з наявністю екранів різної висоти і з урахуванням рельєфу місцевості. Була створена програма чисельного розрахунку «Barrier».

Розглядалося чотири сценарії розташування двох автодоріг, автотранспорту та екранів. Розрахунки виконувалися за такими даними: швидкість повітряного потоку 5 м/с, середня інтенсивність емісії оксидів азоту $Q_{NO\,\text{x}}$=4,8 г/с, з яких NO_2 становить величину порядку 5 % від викиду NO_x, а NO – 95 %, геометричні розміри області: 28 м по осі O*x* і 14 м по осі O*y*, яка спрямована вертикально вгору. Координатами джерела викиду *NO* і NO_2 є координати місця розташування отвору вихлопної труби автомобіля.

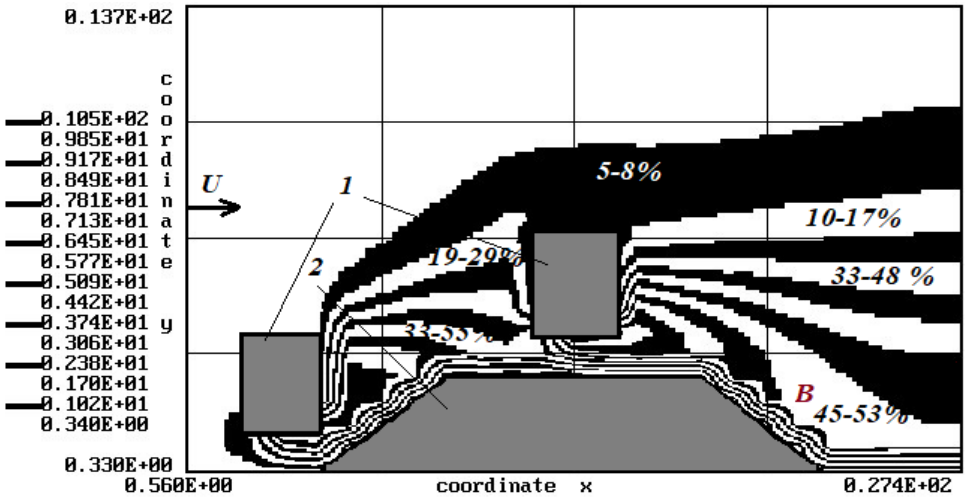


Рисунок 2.44 – Розподіл поля концентрації *NO* за наявності насипу без екрана

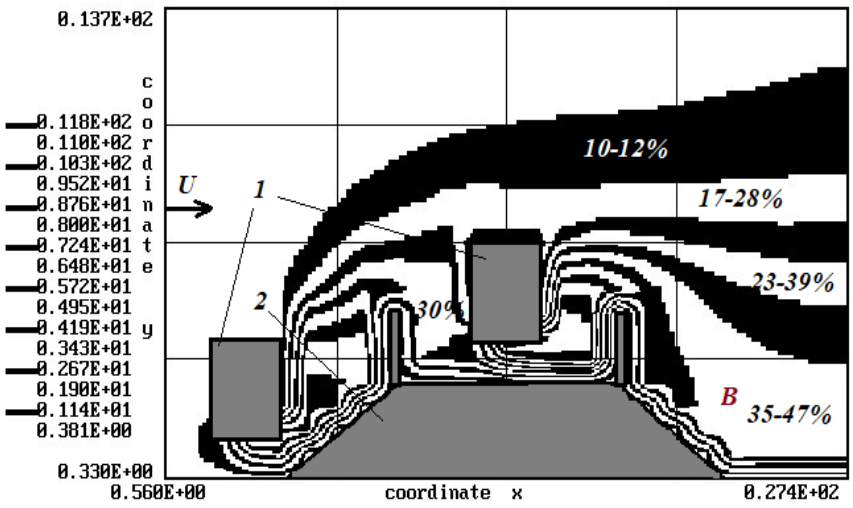


Рисунок 2.45 – Розподіл поля концентрації *NO* за наявності насипу з екранами висотою *H*=2,5 м

Аналіз поля концентрації на наведених рисунках показує, що чисельна модель дозволяє врахувати геометрію рельєфу. Застосування екранів призводить до зниження рівня забруднення в області В, проте збільшується зона забруднення по висоті.

Далі на рис. 2.46 показана концентрація домішки за насипом.

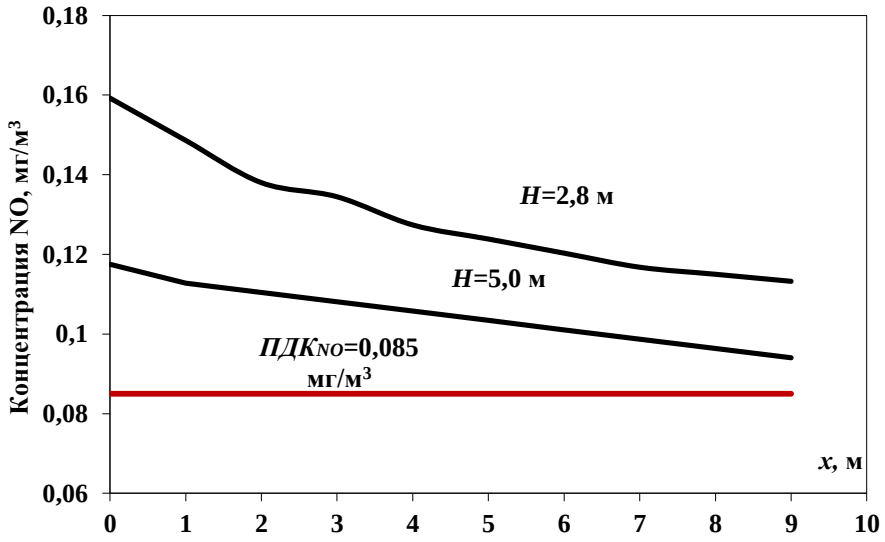


Рисунок 2.46 – Зміна концентрації *NO* на висоті 1,7 м уздовж осі О*x* в області В (за другим екраном)

Зміна концентрації *NO* за другим екраном на висоті 1,7 м від поверхні землі вздовж осі O*x* (рис. 2.46) показує, що застосування екранів знижує рівень забруднення, але гранично допустиме значення концентрації може бути досягнуто тільки на відстані більш ніж 10 м від другого екрана.

2.2 Дослідження ефективності використання вентилятора для зниження рівня хімічного забруднення робочих зон

На наступному етапі було побудовано математичну модель для оцінювання ефективності використання аксіального вентилятора для зменшення рівня забруднення робочих зон біля автотраси. Такий засіб зниження рівня хімічного забруднення робочих зон використовується в США [182]. Для оцінювання його ефективності потрібно мати спеціалізовані математичні моделі, щоб на стадії розробки проєкту отримати необхідні дані щодо рівня забруднення повітря в робочих зонах залежно від швидкості повітря, висоти розташування вентилятора, висоти захисних бар'єрів тощо. Зауважимо, що під час теоретичного розв'язання цієї задачі виникають певні труднощі:

1. Вентилятор завжди кріпиться до бар'єра, а бар'єр як перешкода впливає на рух повітряних мас та, внаслідок цього, на формування зони забруднення.

2. Під час роботи вентилятора створюється потік повітря, що додатково впливає на рух повітряних мас.

Тобто під час роботи вентилятора в робочих зонах спостерігається дуже складна аеродинамічна картина, на базі якої формується зона забруднення.

Далі розглядається побудова математичної моделі, що дозволяє прогнозувати ефективність використання аксіального вентилятора з

урахуванням впливу бар'єра та потоку повітря, що створюється вентилятором та потоком вітру.

Для моделювання процесу поширення домішки в робочій зоні використовується рівняння масопереносу та рівняння Лапласа для потенціалу швидкості [131]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\sum_{i=1}^{N}Q_i\delta\left(x-x_i\right)\delta\left(y-y_i\right)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}=0.$$

$$u=\frac{\partial P}{\partial x};\quad v=\frac{\partial P}{\partial y}.$$

Пояснення для цих рівнянь наведені в цьому розділі вище. Розглянемо постановку граничних умов для моделюючих рівнянь (рис. 2.47).

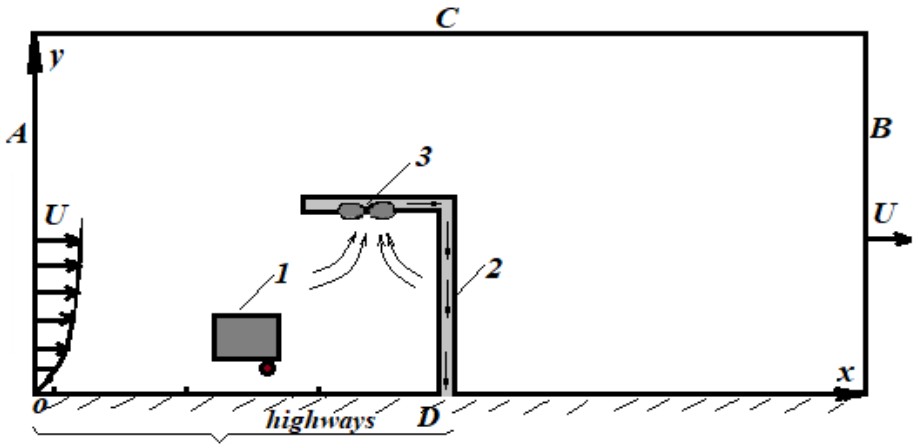


Рисунок 2.47 – Розрахункова схема (сценарій 1):
1 – джерело викиду хімічно небезпечної речовини (автомобіль); 2 – бар'єр; 3 – аксіальний вентилятор.

Граничні умови для моделюючих рівнянь такі [109]:

1. $C = 0$; $\left.\frac{\partial P}{\partial x}\right|_A = U$ – умова на межі *A*, де U – відома швидкість повітряного потоку; там, де розташовано вентилятор, задається швидкість повітря при всмоктуванні.

2. $\left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_B = 0$; $P = \text{const}$ – межа *B*.

3. $\left.\frac{\partial C}{\partial y}\right|_{C,D} = 0$; $\left.\frac{\partial P}{\partial y}\right|_{C,D} = 0$ – на межах *C*, *D*.

4. На твердих межах наявна умова непроникності.

Для моменту часу $t = 0$ початкова умова така: $C_{t=0} = 0$.

Для чисельного розв'язання моделюючого рівняння масопереносу використовувалися дві різницеві схеми. Для побудови першої різницевої схеми здійснювалося таке його фізичне розщеплення:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum_{i=1}^{N} Q_i \delta\left(x - x_i\right)\delta\left(y - y_i\right).$$

Перше рівняння із цієї системи – це рівняння конвективного переносу, друге рівняння – рівняння дифузії, третє рівняння – рівняння, що показує зміну концентрації домішки внаслідок дії джерела емісії.

При чисельному інтегруванні використовуються такі залежності [109]:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^{+}C}{\partial y} + \frac{\partial v^{-}C}{\partial y},$$

$$u^{+} = \frac{u + |u|}{2}, u^{-} = \frac{u - |u|}{2},$$

$$v^{+} = \frac{v + |v|}{2}, v^{-} = \frac{v - |v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^{+}C}{\partial x} \approx \frac{u^{+}_{i+1,j}C^{n+1}_{i,j} - u^{+}_{i,j}C^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x} = L^{+}_{x}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^{-}C}{\partial x} \approx \frac{u^{-}_{i+1,j}C^{n+1}_{i+1,j} - u^{-}_{i,j}C^{n+1}_{i,j}}{\Delta x} = L^{-}_{x}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^{+}C}{\partial y} \approx \frac{v^{+}_{i,j+1}C^{n+1}_{i,j} - v^{+}_{i,j}C^{n+1}_{i,j-1}}{\Delta y} = L^{+}_{y}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^{-}C}{\partial y} \approx \frac{v^{-}_{i,j+1}C^{n+1}_{i,j+1} - v^{-}_{i,j}C^{n+1}_{i,j}}{\Delta y} = L^{-}_{y}C^{n+1}.$$

Схема розщеплення для рівняння конвективного переносу записується так :

– на першому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C^{k}_{i,j} - C^{n}_{i,j}}{\Delta t} + L^{+}_{x}C^{k} + L^{+}_{y}C^{k} = 0;$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C^{n+1}_{i,j} - C^{k}_{i,j}}{\Delta t} + L^{-}_{x}C^{n+1} + L^{-}_{y}C^{n+1} = 0.$$

Невідоме значення C у кожному рівнянні визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії використовується двоетапна різницева схема розщеплення, яка має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}-C_{i,j}^{n}}{\Delta t}=\left[\mu_x\frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}\right]+\left[\mu_y\frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}\right],$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+1}-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t}=\left[\mu_x\frac{C_{i+1,j}^{n+1}-C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2}\right]+\left[\mu_y\frac{C_{i,j+1}^{n+1}-C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2}\right].$$

Для побудови другої різницевої схеми здійснюється така апроксимація других похідних [109]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)\approx\mu_x\frac{C_{i+1,j}^{n+1}-C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2}-\mu_x\frac{C_{i,j}^{n+1}-C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2}=M_{xx}^{-}C^{n+1}+M_{xx}^{+}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)\approx\mu_y\frac{C_{i,j+1}^{n+1}-C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2}-\mu_y\frac{C_{i,j}^{n+1}-C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2}=M_{yy}^{-}C^{n+1}+M_{yy}^{+}C^{n+1}.$$

Друга різницева схема розщеплення має вигляд:

- перший крок розщеплення

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}-C_{i,j}^{n}}{\Delta t}=0.5\left(-L_x^{+}C^{n+\frac{1}{2}}-L_y^{+}C^{k}+M_{xx}^{n+\frac{1}{2}}+M_{yy}^{n}\right);$$

- другий крок розщеплення

$$\frac{C_{i,j}^{n+1}-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t}=0.5\left(-L_x^{+}C^{n+\frac{1}{2}}-L_y^{+}C^{k+1}+M_{xx}^{n+\frac{1}{2}}+M_{yy}^{n+1}\right).$$

Для чисельного інтегрування останнього рівняння із системи фізичного розщеплення використовується метод Ейлера [100]. Розрахункова залежність має вигляд

$$C_{i,j}^{n+1} = C_{i,j}^{n} + \Delta t \sum Q_i \delta\left(x - x_i\right)\delta\left(y - y_i\right) / \Delta x / \Delta y,$$

де $\Delta x, \Delta y$ – різницеві кроки.

Для розв'язання рівняння Лапласа для потенціалу швидкості застосовується метод встановлення розв’язку за часом для нестаціонарного рівняння вигляду (2.22) з використанням явної різницевої схеми [12, 99, 133]:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \Delta t \frac{P_{i+1,j}^{n} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{P_{i,j+1}^{n} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}.$$

За допомогою цієї явної залежності визначається поле потенціалу швидкості в усіх внутрішніх осередках розрахункової області.

За відомими значеннями потенціалу швидкості розраховуються компоненти вектора швидкості:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

На базі побудованої чисельної моделі створено код SCREEN-2A.

Розроблена чисельна модель була використана для розв’язання задачі з оцінювання ефективності використання аксіального вентилятора для зниження рівня загазованості в робочих зонах. Розглядалися такі сценарії:

1. Захисний бар’єр + аксіальний вентилятор (сценарій 1, рис. 2.47).

2. Захисний бар’єр + аксіальний вентилятор+ додатковий екран на бар’єрі (сценарій 2, рис. 2.48).

3. Захисний бар’єр + аксіальний вентилятор + додатковий бар’єр на іншій стороні дороги (сценарій 3, рис. 2.49).

Обчислювальний експеримент виконувався за таких даних: швидкість *U* повітряного потоку 1.7 м/с та 6 м/с; інтенсивність емісії *CO* від автомобілів 0,02 г/(с· м); швидкість всмоктування на вході до вентилятора 12 м/с; розміри розрахункової області 12 м на 10 м; розміри автомобіля: ширина 1,7 м, висота 1,6 м.

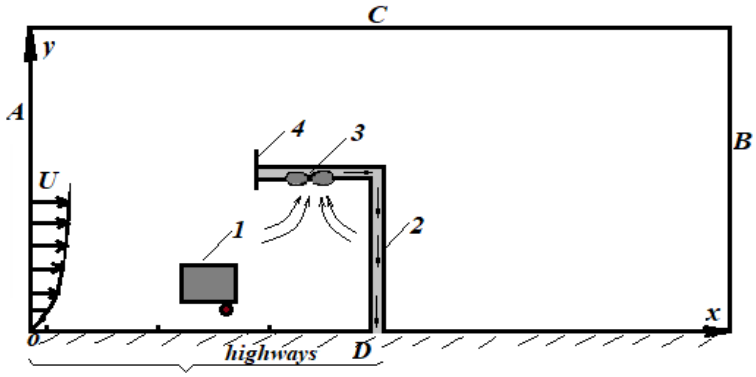


Рисунок 2.48 – Розрахункова схема (сценарій 2):
1 – джерело викиду хімічно небезпечної речовини (автомобіль); 2 – бар’єр; 3 – аксіальний вентилятор; 4 – додатковий екран

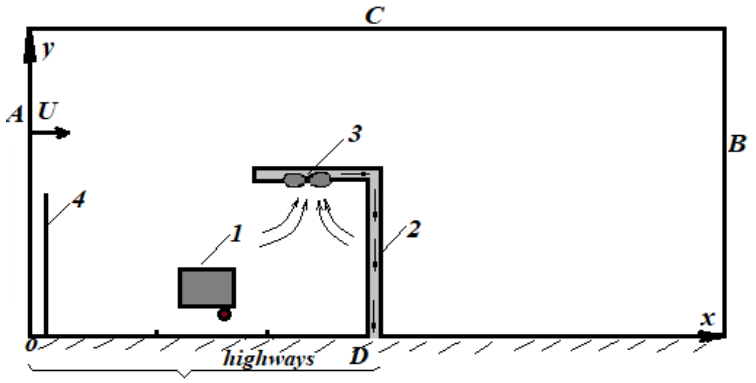


Рисунок 2.49 – Розрахункова схема (сценарій 3):
1 – джерело викиду хімічно небезпечної речовини (автомобіль); 2, 4 – бар’єри; 3 – аксіальний вентилятор.

Нижче на рисунках показано зону забруднення (поле концентрації *CO*, сценарій 1) для швидкості повітряного потоку 1.7 м/с (рис. 2.50) та 6 м/с (рис. 2.51). На цих рисунках (як і на інших) кожне число показує у відсотках концентрацію від максимальної концентрації в області дослідження.

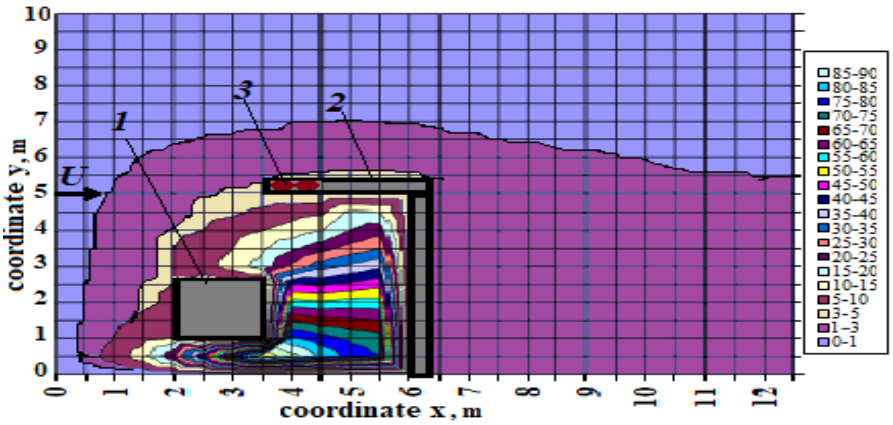


Рисунок 2.50 – Зона забруднення, швидкість повітряного потоку U=1,7 м/с (сценарій 1, C_{COmax} = 7.6869 мг/м^3):
1 – джерело викиду хімічно небезпечної речовини (автомобіль); 2 – бар’єр; 3 – аксіальний вентилятор.

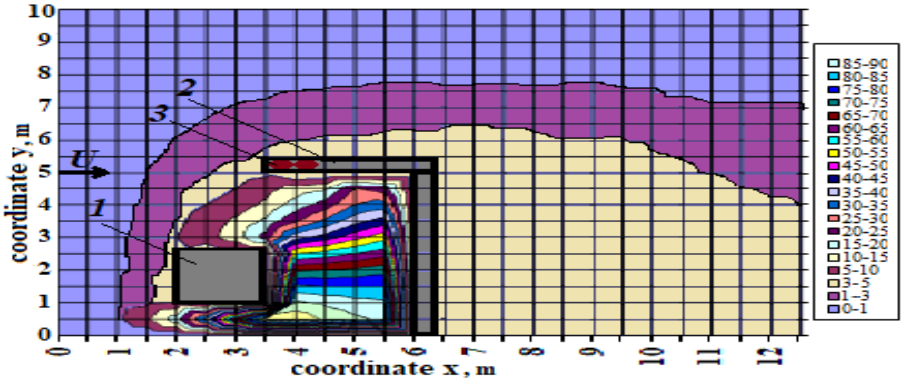


Рисунок 2.51 – Зона забруднення, швидкість повітряного потоку U=6 м/с (сценарій 1, C_{COmax} = 5.2694 мг/м^3):
1 – джерело викиду хімічно небезпечної речовини (автомобіль); 2 – бар’єр; 3 – аксіальний вентилятор.

Наведені рисунки демонструють, що зі збільшенням швидкості повітряного потоку ефективність роботи вентилятора зменшується. Це пов’язано зі знесенням домішки від зони «всмоктування». Концентрація *CO* за бар’єром при швидкості повітряного потоку 6 м/с приблизно на 3–5% більша, ніж при швидкості повітряного потоку 1,7 м/с. Таким чином, зі збільшенням швидкості повітряного потоку спостерігається зменшення ефективності використання аксіального вентилятора. Більш наочно це показує рис. 2.52, де наведено дані щодо розподілу концентрації *CO* за бар’єром на висоті 1,7 м.

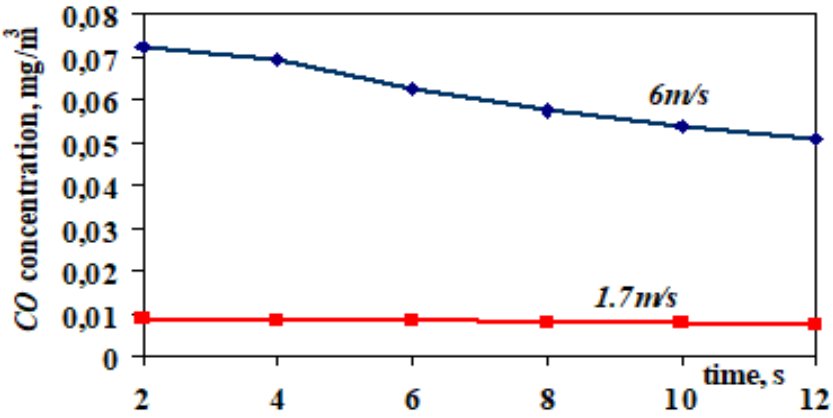


Рисунок 2.52 – Концентрація *CO* за бар’єром для різної швидкості потоку

Далі на рис. 2.53 показана зона хімічного забруднення (поле концентрації *CO*) для сценарію 2, швидкість повітряного потоку 6 м/с; на рис. 2.54 – для сценарію 3, швидкість повітряного потоку 6 м/с.

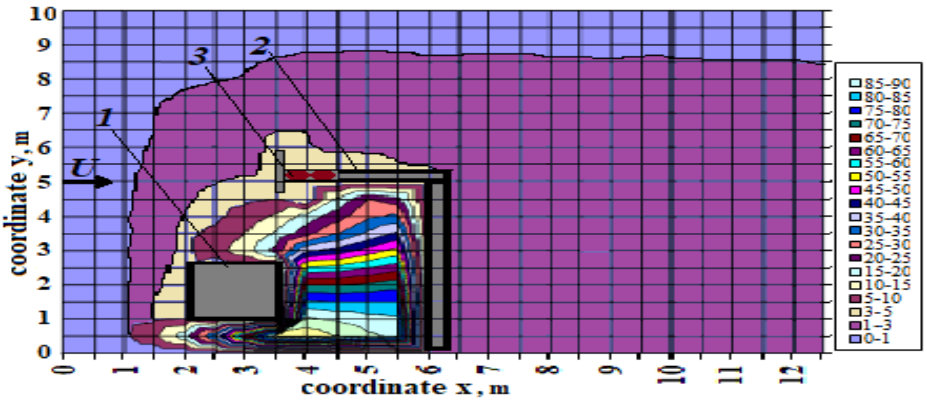


Рисунок 2.53 – Зона забруднення, швидкість повітряного потоку U=6 м/с (сценарій 2, C_{COmax} = 5,1068 мг/м^3):
1 – джерело викиду хімічно небезпечної речовини (автомобіль); 2 – аксіальний вентилятор; 3 – додатковий елемент.

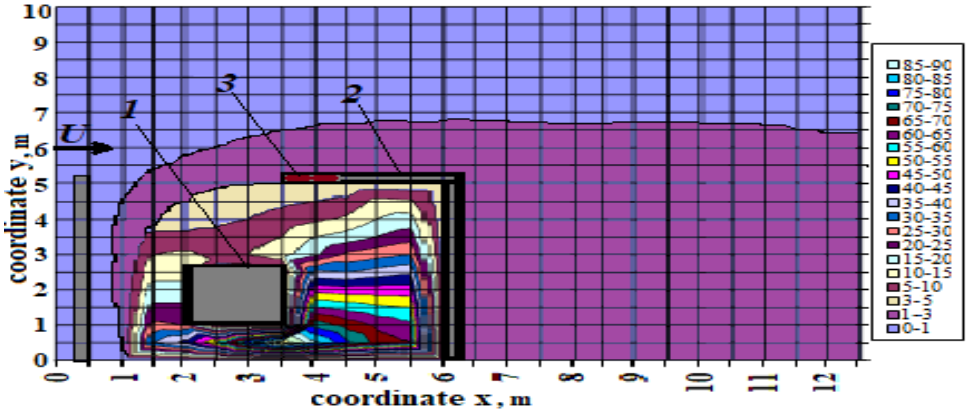


Рисунок 2.54 – Зона забруднення, швидкість повітряного потоку U=6 м/с (сценарій 3, C_{COmax} = 9.6927 мг/м^3):
1 – джерело викиду хімічно небезпечної речовини (автомобіль); 2 – бар’єр; 3 – аксіальний вентилятор.

На рис. 2.55 наведено дані щодо розподілу концентрації *CO* за бар’єром на висоті 1.7 м для всіх сценаріїв:

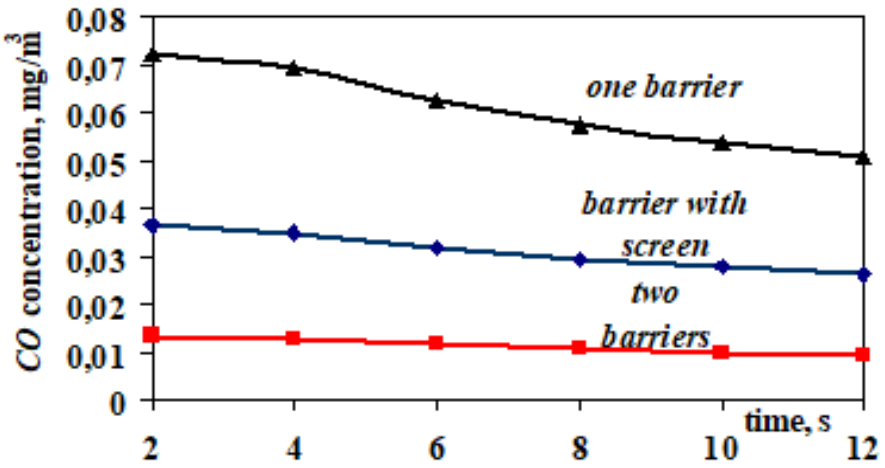


Рисунок 2.55 – Концентрація *CO* за бар'єром

Аналіз рис. 2.55 показує, що використання додаткового елемента на бар'єрі (сценарій 2) дозволяє знизити концентрацію *CO* за бар'єром майже вдвічі порівняно зі сценарієм 1. У випадку сценарію 3 концентрація *CO* знижується майже на 80 % порівняно зі сценарієм 1.

Слід наголосити, що дослідження з визначення ефективності використання вентилятора для зниження рівня забруднення повітря біля автотрас зараз привертає значну увагу дослідників. Так, у роботі [96] наведено результати комплексу теоретичних та експериментальних досліджень у цій галузі. У роботі [128] розглянута чисельна модель розв'язання задачі аеродинаміки при роботі вентилятора, що має два всмоктувальних вікна. Ця чисельна модель розроблена для розв'язання еволюційного рівняння (2.22) на базі такої різницевої схеми розщеплення [100]:

- перший крок розщеплення:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^{n}}{0{,}5\Delta t} = \frac{P_{i+1,j}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2},$$

- другий крок розщеплення:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1}-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{0,5\Delta t}=\frac{P_{i+1,j}^{n+1}-P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2}+\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}+\frac{P_{i,j+1}^{n+1}-P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2}+\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}.$$

На кожному кроці розщеплення потенціал швидкості знаходять за явною формулою [100].

Здійснено побудову комп'ютерної моделі аеродинаміки на базі цієї різницевої схеми розщеплення для розрахунку поля швидкості повітряного потоку в разі використання вентилятора, що має два всмоктувальних вікна. Ця чисельна модель має більшу розрахункову стійкість та дозволяє розв'язувати задачу з визначення ефективності використання вентилятора з подвійними всмоктувальними вікнами для умов, що раніше не розглядалися:

1. Враховується вплив корпусу авто на формування поля швидкості повітряного потоку біля вентилятора.

2. Враховується розташування на всмоктувальному пристрої додаткового екрана Т-подібної форми, що використовується для локальної зміни напряму повітряного потоку біля вентиляційного пристрою (потрібно наголосити, що наявність такого екрана різко змінює кривизну ліній струму, внаслідок чого ряд різницевих схем втрачають стійкість та унеможливлюють моделювання).

3. Враховується нерівномірний профіль швидкості повітряного потоку на вході в розрахункову область (модель Швець –Юдіна) [50].

$$u=u_1\left(\frac{\lg\frac{z}{z_0}}{\lg\frac{z_1}{z_0}}\right),$$

де u_1 – швидкість вітру на висоті;

z_1, z_0 – шорсткість.

Нижче на рисунках показано розв’язок задачі за наявності цих відмінностей. На рис. 2.56 наведено схему розрахункової області.

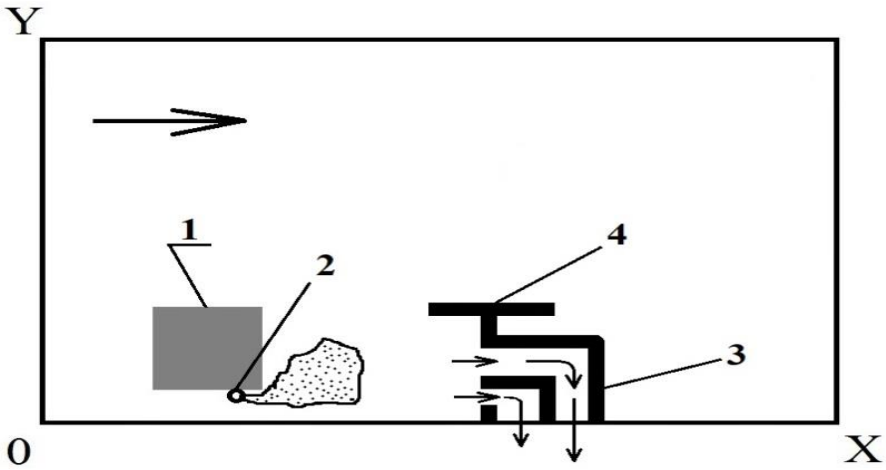


Рисунок 2.56 – Розрахункова схема:
1 – корпус авто; 2 – місце викиду хімічно небезпечної речовини; 3 – всмоктувальна система; 4 – Т-подібний екран.

Розрахунок здійснювався за таких параметрів : $u_1 = 2$ м/с, $z_1 = 1$ м, $z_0 = 0.2$ см, швидкість повітря у всмоктувальних отворах 5 м/с, висота кожного отвору 0.3 м, висота Т-подібного екрана 0.6 м, довжина горизонтальної частини екрана 0.6 м; інтенсивність емісії *CO* 1 г/с. Розміри розрахункової області 7.5 м × 6 м.

На рис. 2.57 показано поле концентрації *CO* в розрахунковій області. Значення концентрації наведено у відсотках від максимального значення $C_{\max} = 0.15$ г/м^3 (на рис. 2.57 цій точці відповідає маркер 99). Друк чисел здійснено у форматі «INTEGER», тобто без друку дрібної частини числа.

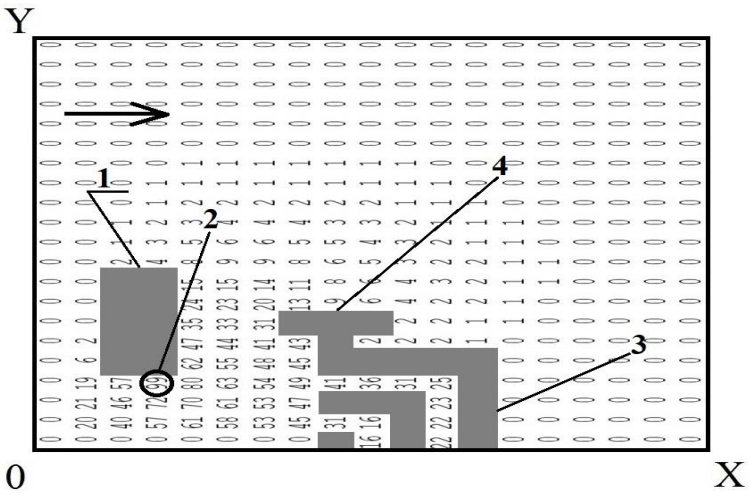


Рисунок 2.57 – Поле концентрації *CO* (C_{max} =0,15 г/м^3):

1 – корпус авто; 2 – місце викиду хімічно небезпечної речовини; 3 – всмоктувальна система; 4 – Т-подібний екран.

Як бачимо з рис. 2.57, основна область забруднення формується перед всмоктувальною системою, а наявність екрана на цій системі не дає можливості забруднювачу інтенсивно рухатися в робочу зону.

Далі на рис. 2.58 показано розподіл концентрації *CO* в робочий зоні за всмоктувальною системою на висоті $y = 1.7$ м. Точці $x = 0$ відповідає положення всмоктувальної системи. На цьому рисунку значення концентрації наведено для трьох сценаріїв:

1. Немає всмоктувальної системи, тобто є лише авто, що викидає відому кількість домішки в повітря.

2. Працює всмоктувальна система, але немає Т-подібного екрана.

3. Працює всмоктувальна система сумісно з Т-подібним екраном.

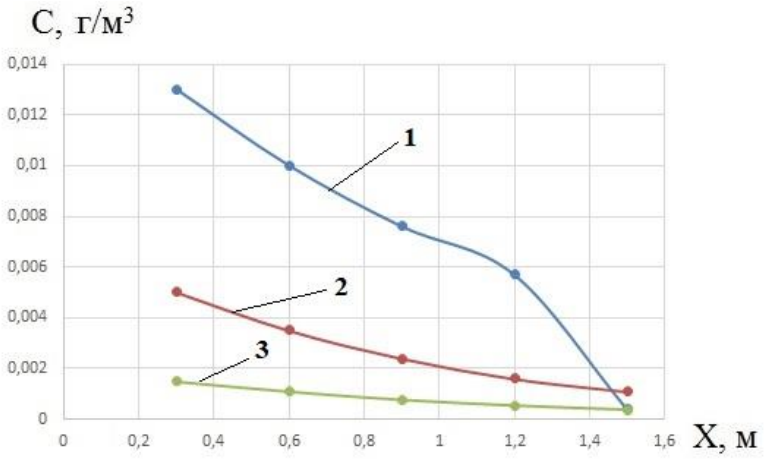


Рисунок 2.58 – Концентрація *CO* за всмоктувальною системою:
1 – без всмоктувальної системи; 2 – працює всмоктувальна система, але немає Т-подібного екрана; 3 – працює всмоктувальна система сумісно з Т-подібним екраном.

Як можна бачити з рис. 2.58, використання всмоктувальної системи сумісно Т-подібним екраном дозволяє суттєво зменшити рівень забруднення повітря в робочий зоні. Так, порівняно з першим сценарієм, тобто за повної відсутності системи захисту, за наявності екрану концентрація на відстані 0.3 м зменшилася практично у 8 разів, а порівняно з другим сценарієм – майже в три рази. Також можна відслідкувати таку закономірність: характер зміни концентрації в разі використання екрана стає більш «повільним» та «плавним».

Розглянуто економічні витрати при використанні системи всмоктування для зниження рівня забруднення повітря в робочих зонах. Вартість вентилятора типу CM 21.2L Dundar (витрата 2500 м^3/год) порядку 230 євро. Установка вентилятора – 100 євро. Загальна вартість – близько 330 євро.

2.3 Тестування чисельних моделей

Далі наведено результати верифікації побудованої чисельної моделі. Для цього було виконано лабораторний експеримент. Джерелом «забруднення» був іонізатор AirNASA KJF03. Цей іонізатор було розташовано біля моделі бар'єра. Розглядалися три сценарії:

1. Бар'єр з горизонтальним додатковим елементом (сценарій 1, рис. 2.59).

2. Бар'єр з додатковим елементом, що має нахил (сценарій 2, рис. 2.60).

3. Бар'єр з горизонтальним додатковим елементом та за наявності моделі автомобіля (сценарій 3, рис. 2.61).

Для вимірювання концентрації негативних іонів, що «викидалися» іонізатором, використовувався прилад AIR ION TESTER KT-401. Для створення потоку повітря використовувалася повітродувка. Швидкість повітряного потоку визначалася за допомогою приладу GM 8908.

Експеримент виконувався за таких параметрів: викид іонів – 10^7 часток/с; швидкість потоку 0,17–0,26 м/с; висота джерела емісії 1,2 см; розміри екрана 16 см × 0,3 см × 7 см; довжина від джерела емісії до екрана 12 см. Довжина додаткового елемента 2 см (додатковий горизонтальний елемент) та 3 см (додатковий елемент, що має нахил). Замір концентрації іонів здійснювався на висоті 10 см. При теоретичному визначенні концентрації іонів приймалося, що швидкість потоку дорівнює 0,21 м/с. Модель автомобіля мала довжину $L = 0{,}21$ м, висоту 0,1 м. У ході обчислювального експерименту модель автомобіля моделювалася «прямокутником» розміром 0,21 м × 0,1 м. Лабораторні експерименти виконувалися при температурі повітря 21 ^{0}C. Як критерій подібності використовувалося число Рейнольдса, а при розрахунку числа Рейнольдса як масштаб застосовувалася довжина автомобіля L, швидкість повітряного потоку V=10см/с, коефіцієнт кінематичної в'язкості ν при температурі 21^{0}C ($\nu = 15.06 \cdot 10^{-6}$ м^2/с). Значення числа Рейнольдса розраховувалося так:

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot L}{\nu}.$$

Нижче наведено результати виконаних експериментів.

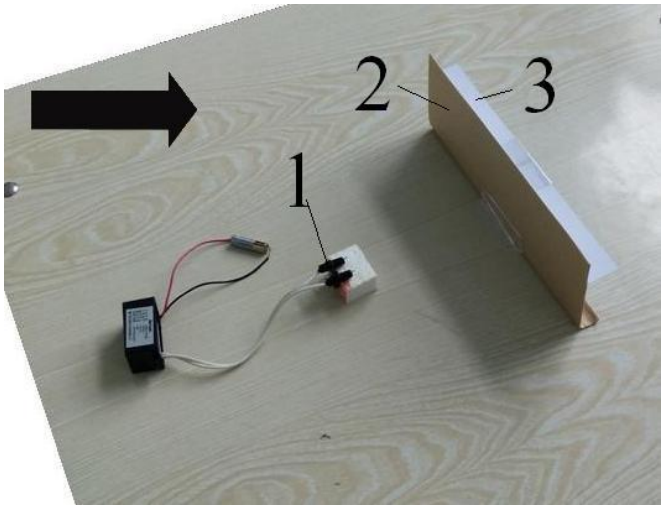


Рисунок 2.59 – Розташування обладнання (сценарій 1):
1 – джерело емісії; 2 – бар’єр; 3 – додатковий елемент.

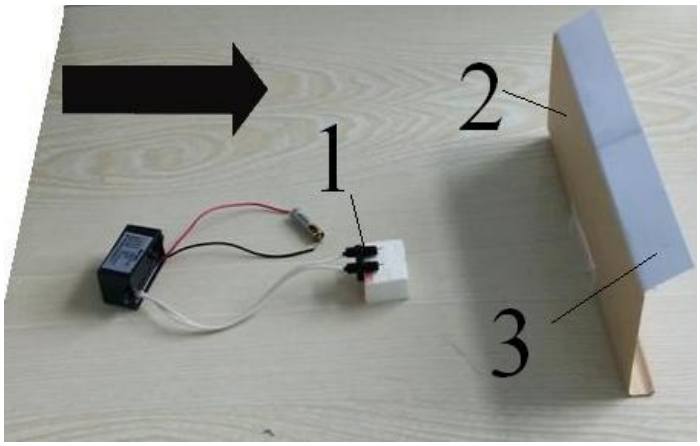


Рисунок 2.60 – Розташування обладнання (сценарій 2):
1 – джерело емісії; 2 – бар’єр; 3 – додатковий елемент.

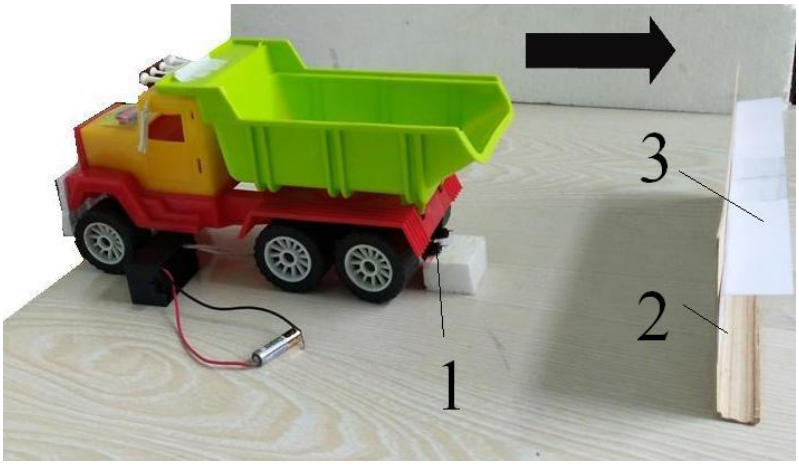


Рисунок 2.61 – Розташування обладнання (сценарій 3):
1 – джерело емісії; 2 – бар’єр; 3 – додатковий елемент.

У табл. 2.6 наведено експериментальне значення концентрації негативних іонів (за бар’єром) порівняно з теоретичним розрахунком для сценарію 1.

У табл. 2.7 наведено значення концентрації негативних іонів (експеримент + розрахунок) за бар’єром для сценарію 2.

Таблиця 2.6 – Концентрація іонів за захисним екраном (сценарій 1)

x, см	Концентрація, часток/см^3, експеримент/розрахунок
1	$(0{,}47 – 0{,}43)\cdot 10^7 / (0{,}52)\cdot 10^7$
2	$(0{,}43 – 0{,}40)\cdot 10^7 / (0{,}47)\cdot 10^7$
3	$(0{,}41 – 0{,}37)\cdot 10^7 / (0{,}44)\cdot 10^7$
4	$(0{,}37 – 0{,}32)\cdot 10^7 / (0{,}38)\cdot 10^7$

Таблиця 2.7 – Концентрація іонів за захисним екраном (сценарій 2)

x, см	Концентрація, часток/см^3, експеримент/розрахунок
1	$(0{,}38 – 0{,}35)\cdot 10^7 / (0{,}43)\cdot 10^7$
2	$(0{,}34 – 0{,}31)\cdot 10^7 / (0{,}37)\cdot 10^7$
3	$(0{,}31 – 0{,}26)\cdot 10^7 / (0{,}35)\cdot 10^7$
4	$(0{,}29 – 0{,}23)\cdot 10^7 / (0{,}32)\cdot 10^7$

Далі в табл. 2.8 показано значення концентрації негативних іонів для сценарію 3.

Таблиця 2.8 – Концентрація іонів, часток/см^3

Відстань *x*, см	Експеримент	Розрахунок
1	$(0{,}41 – 0{,}38)\cdot 10^7$	$0{,}45\cdot 10^7$
2	$(0{,}36– 0{,}32)\cdot 10^7$	$0{,}42\cdot 10^7$
4	$(0{,}28–0{,}23)\cdot 10^7$	$0{,}32\cdot 10^7$

Таким чином, дані експерименту узгоджуються з розрахунком на базі розроблених чисельних моделей.

2.4 Використання захисних бар'єрів з «TX Active» поверхнею для зниження рівня хімічного забруднення в робочих зонах

Одним з прогресивних засобів захисту від хімічного забруднення робочих зон біля автодоріг є використання поверхонь «photocatalytic» (або «TX Active» поверхонь), тобто поверхонь, що поглинають *NO* під дією сонячного світла [119, 153, 168, 173]. Така поверхня створюється за рахунок додавання TiO_2 при виготовленні цементу.

Відомо, що під дією сонячного світла на поверхні «photocatalytic» відбуваються такі реакції (рис. 2.62) [173]:

$$NO + OH^* = NO_2 + H^+$$
$$NO_2 + OH^* = NO_3 + H^+$$

Тобто умовно можна назвати цей процес «нейтралізацією» *NO*.

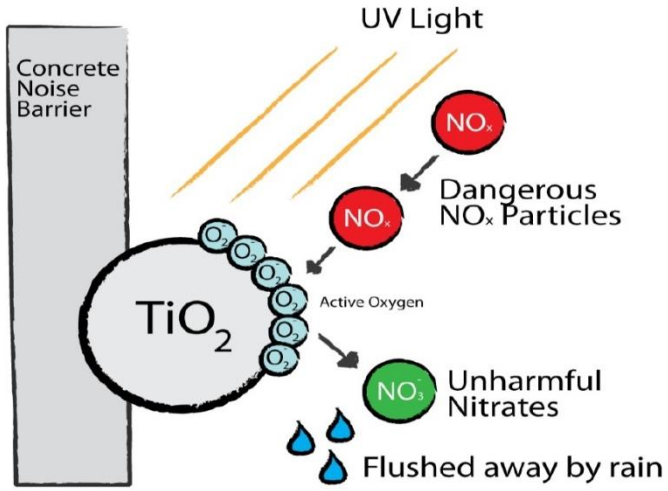


Рисунок 2.62 – Схема «нейтралізації» *NO* при використанні «TX Active» поверхні [173]

Такі захисні бар’єри вже застосовуються на практиці (рис. 2.63).

Рисунок 2.63 – «TX Active» захисний бар’єр в Торонто [153]

У ході проєктування «TX Active» бар'єрів (рис. 2.64) необхідно визначити ефективність зниження концентрації забруднювача в робочих зонах. Але ефективність використання «TX Active» бар'єра залежить від багатьох факторів: його висоти, розташування відносно траси, швидкості повітря тощо. Крім цього, відомо, що деякі бар'єри мають лише частково покриття TiO_2. Тобто на практиці ми маємо дуже різноманітні конструкції бар'єрів та різні умови їх експлуатації. У зв'язку з цим, для практики є дуже важливим створення математичних моделей, що дозволяють адекватно визначати ефективність цих бар'єрів для захисту робочих зон від забруднення.

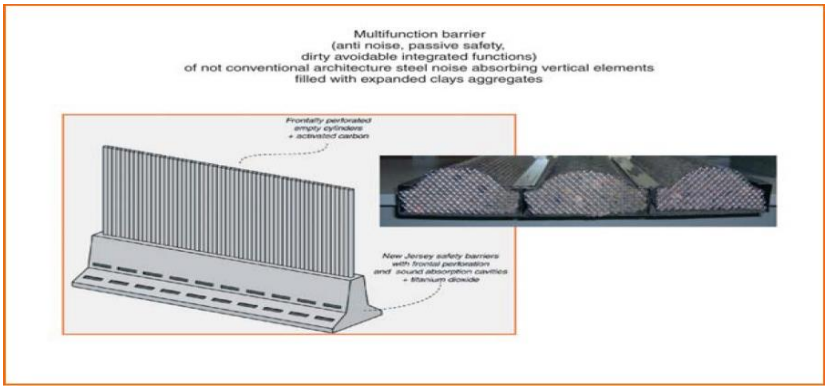


Рисунок 2.64 – Захисний бар'єр з TiO_2 покриттям [174]

Для розв'язання задачі з визначення ефективності використання бар'єрів з «photocatalytic» поверхнею була побудована математична модель, яку ми й розглянемо Для моделювання процесу поширення забруднювача в повітрі робочих зон та поглинання його поверхнею будемо використовувати такі рівняння.

Рівняння масопереносу забруднювача:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}+\frac{\partial\left(w-w_S\right)C}{\partial z}+\sigma C=$$
$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial C}{\partial z}\right)+ \qquad (2.25)$$
$$\sum_{i=1}^{n}Q_i\left(t\right)\delta\left(x-x_i\right)\delta\left(y-y_i\right)\delta\left(z-z_i\right)$$

Рівняння для потенціалу швидкості:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}=0,, \qquad (2.26)$$

$$u=\frac{\partial P}{\partial x};\quad v=\frac{\partial P}{\partial y};\quad w=\frac{\partial P}{\partial z}, \qquad (2.27)$$

де P – потенціал швидкості;

C – концентрація забруднювача;

$Q_i(t)$ – інтенсивність емісії забруднювача;

u, v, w – проєкції вектора швидкості повітряного потоку на осі декартової системи координат;

t – час;

w_S –швидкість осідання забруднювача;

σ – параметр, що враховує вимивання забруднювача;

$\mu=\left(\mu_x,\mu_y,\mu_z\right)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії;

x_i, y_i, z_i – координати джерела емісії;

$\delta(x-x_i),\delta(y-y_i),\delta(z-z_i)$ – дельта-функція Дірака.

Граничні умови для моделюючих рівнянь:

1. $\frac{\partial P}{\partial n}=0$ на непроникних межах.

2. $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ на верхній межі.

3. $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$ на межі, де потік втікає в розрахункову область, (V_n швидкість повітряного потоку).

4. P=const на межі «виходу» потоку з розрахункової області.

5. На межі входу потоку: $C = 0$.

6. На межі виходу потоку: $\left.\frac{\partial C}{\partial n}\right|_{\Gamma_2} = 0.$

7. На поверхні $z = 0$, $z = L_z$ (L_z – верхня межа області)

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні.

Для моменту часу $t = 0$ початкова умова записується так: $C = 0$.

Для моделювання процесу поглинання «TX Active» поверхнею будемо використовувати на цій поверхні таку граничну умову (для концентрації *NO):*

$$C = 0. \qquad (2.28)$$

Для визначення кількості забруднювача, що поглинає «TX Active» поверхня за час *dt*, використовується така процедура: на кожному новому часовому кроці розрахунок починається з того, що в комірці, яка прилягає до «TX Active» поверхні, задається гранична умова (2.28). Далі, впродовж інтервалу часу *dt* розраховується потік маси забруднювача до «TX Active» поверхні на базі закону Фіка. Тобто, розраховується потік маси забруднювача від зони з високою концентрацією (різницева комірка, що прилягає до photocatalytic поверхі) до цієї поверхні. Закон Фіка для цього процесу записується так:

$$J = -\mu S \frac{\partial C}{\partial n} dt,$$

де J – потік маси забруднювача, що потрапляє на поверхню;

μ – коефіцієнт дифузії;

S – площа поверхні, крізь яку проходить дифузійний потік.

Градієнт концентрації запишемо так:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = \frac{C_{i,j} - C_{surf}}{s_x},$$

де $s_x = 0.5 \cdot h_x$;

h_x – крок різницевої сітки в напряму X;

C_{surf} – концентрація забруднювача на «photocatalytic» поверхі;

$C_{i,j}$ – концентрація забруднювача в різницевій комірці, що прилягає до «photocatalytic» поверхі.

Зауважимо, що концентрація забруднювача розраховується в центрі різницевої комірки.

Таким чином, розраховується маса забруднювача, що «витікає» з різницевої комірки за час dt на «TX Active» поверхню. Далі перераховується концентрація забруднювача в різницевій комірці, що прилягає до «photocatalytic» поверхі.

У розробленій чисельній моделі поглинальна поверхня задається за допомогою маркерів.

Розглянемо побудову чисельної моделі для розв’язання задачі з визначення ефективності використання бар’єрів з «TX Active» поверхнею.

По-перше, розглянемо, як розв’язується рівняння масопереносу. Виконаємо геометричне розщеплення рівняння масопереносу таким чином:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial vC}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial\left(w-w_g\right)C}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial C}{\partial z}\right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\sigma C=\sum Q_i(t)\delta\left(x-x_i(t)\right)\delta\left(y-y_i(t)\right). \qquad (2.29)$$

При побудові чисельної моделі тут і далі буде використовуватися позначка $w=w-w_g$.

Далі виконаємо такі перетворення [109]:

$$\frac{\partial uC}{\partial x}=\frac{\partial u^+C}{\partial x}+\frac{\partial u^-C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y}=\frac{\partial v^+C}{\partial y}+\frac{\partial v^-C}{\partial y},$$

$$\frac{\partial wC}{\partial z}=\frac{\partial w^+C}{\partial z}+\frac{\partial w^-C}{\partial z},\ \frac{\partial wC}{\partial z}=\frac{\partial w^+C}{\partial z}+\frac{\partial w^-C}{\partial z},$$

де

$$u^+=\frac{u+|u|}{2};\ u^-=\frac{u-|u|}{2};\ v^+=\frac{v+|v|}{2};\ v^-=\frac{v-|v|}{2};\ w^+=\frac{w+|w|}{2};\ w^-=\frac{w-|w|}{2}.$$

Здійснімо апроксимацію похідних за формулами [109]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) \approx \mu_x \frac{C^{n+1}_{i+1,j,k} - C^{n+1}_{i,j,k}}{\Delta x^2} + \mu_x \frac{-C^{n+1}_{i,j,k} + C^{n+1}_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} = M^-_{xx} C^{n+1} + M^+_{xx} C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) \approx \mu_y \frac{C^{n+1}_{i,j+1,k} - C^{n+1}_{i,j,k}}{\Delta y^2} + \mu_y \frac{-C^{n+1}_{i,j,k} + C^{n+1}_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} = M^-_{yy} C^{n+1} + M^+_{yy} C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) \approx \mu_z \frac{C^{n+1}_{i,j,k+1} - C^{n+1}_{i,j,k}}{\Delta z^2} + \mu_z \frac{-C^{n+1}_{i,j,k} + C^{n+1}_{i,j,k-1}}{\Delta z^2} = M^-_{zz} C^{n+1} + M^+_{zz} C^{n+1}.$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u^-_{i+1,j,k} C^{n+1}_{i+1,j,k} - u^-_{i,j,k} C^{n+1}_{i,j,k}}{\Delta x} = L^-_x C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v^+_{i,j+1,k} C^{n+1}_{i,j,k} - v^+_{i,j,k} C^{n+1}_{i,j-1,k}}{\Delta y} = L^+_y C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v^-_{i,j+1,k} C^{n+1}_{i,j+1,k} - v^-_{i,j,k} C^{n+1}_{i,j,k}}{\Delta y} = L^-_y C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^+ C}{\partial z} \approx \frac{w^+_{i,j,k+1} C^{n+1}_{i,j,k} - w^+_{i,j,k} C^{n+1}_{i,j,k-1}}{\Delta z} = L^+_z C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^- C}{\partial z} \approx \frac{w^-_{i,j,k+1} C^{n+1}_{i,j,k+1} - w^-_{i,j,k} C^{n+1}_{i,j,k}}{\Delta z} = L^-_z C^{n+1}.$$

Для першого рівняння масопереносу з (2.29) кінцево-різницева схема записується так [109]:

- крок 1, $k=n+1/2$:

$$\frac{C^k_{i,j,k} - C^n_{i,j,k}}{\Delta t} + L^+_x C^k = M^+_{xx} C^k + M^-_{xx} C^n. \qquad (2.30)$$

- крок 2:

$$\frac{C^{n+1}_{i,j,k} - C^k_{i,j,k}}{\Delta t} + L^-_x C^{n+1} = M^+_{xx} C^n + M^-_{xx} C^{n+1}. \qquad (2.31)$$

Кінцево-різницева схема для другого рівняння масопереносу записується таким чином:

- крок 1, $k=n+1/2$:

$$\frac{C_{i,j,k}^{k}-C_{i,j,k}^{n}}{\Delta t}+L_{y}^{+}C^{k}=M_{yy}^{+}C^{k}+M_{yy}^{-}C^{n}, \qquad (2.32)$$

- крок 2:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1}-C_{i,j,k}^{k}}{\Delta t}+L_{y}^{-}C^{n+1}=M_{yy}^{+}C^{n}+M_{yy}^{-}C^{n+1}.$$

Скінченно-різницеву схему для третього рівняння масопереносу запишемо так:

- крок 1, $k=n+1/2$:

$$\frac{C_{i,j,k}^{k}-C_{i,j,k}^{n}}{\Delta t}+L_{z}^{+}C^{k}=M_{zz}^{+}C^{k}+M_{zz}^{-}C^{n}, \qquad (2.33)$$

- крок 2:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1}-C_{i,j,k}^{k}}{\Delta t}+L_{z}^{-}C^{n+1}=M_{zz}^{+}C^{n}+M_{zz}^{-}C^{n+1}.$$

Для інтегрування останнього рівняння з (2.29) використовується метод Ейлера [100]. Розрахункова залежність має вигляд

$$C^{n+1}=C^{n}-dt*\sigma C+dt*\sum Q_{i}(t)\delta\left(x-x_{i}(t)\right)\delta\left(y-y_{i}(t)\right)\delta\left(z-z_{i}(t)\right).$$

Для чисельного розв'язання рівняння Лапласа, що використовується для визначення поля швидкості потоку в області, де є бар'єри з поглинальним покриттям, використовується явна різницева схема. Для цього рівняння Лапласа записується в «нестаціонарному» вигляді так [100]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \tag{2.34}$$

де t – фіктивний час.

Після апроксимації похідних значення потенціалу швидкості в кожній внутрішній комірці розраховується за формулою (модель 1) [99]:

$$P_{ijk}^{n+1} = P_{ijk}^{n} + \Delta t \frac{P_{i+1,j,k}^{n} - 2P_{ijk}^{n} + P_{i-1,j,k}^{n}}{\Delta x^2} + \tag{2.35}$$

$$+ \Delta t \frac{P_{i,j+1,k}^{n} - 2P_{ijk}^{n} + P_{i,j-1,k}^{n}}{\Delta y^2} +$$

$$+ \Delta t \frac{P_{i,j,k+1}^{n} - 2P_{ijk}^{n} + P_{i,j,k-1}^{n}}{\Delta z^2}.$$

Процес розв'язку припиняється, коли

$$\left| P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n} \right| \le \varepsilon, \tag{2.36}$$

де n – номер ітерації;

ε – мале число.

Значення швидкості повітря (компонент) визначається на сторонах кожної комірки:

$$u_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x},$$

$$v_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y},$$

$$w_{i,j,z} = \frac{P_{i,j,z} - P_{i,j,z-1}}{\Delta z}.$$

На базі визначеного поля швидкості потоку розраховується процес поширення забруднювача в робочій зоні.

Для контролю процесу розрахунку поля швидкості повітряного потоку паралельно з моделлю 1 побудована друга модель. У цій моделі (модель 2) здійснюється таке розщеплення «нестаціонарного» рівняння для потенціалу швидкості [100]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}.$$

Далі використовується явна різницева схема для кожного одновимірного рівняння [99]:

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^{n} + \triangle t \frac{P_{i+1,j,k}^{n} - P_{i,j,k}^{n}}{\Delta x^2} + \triangle t \frac{-P_{i,j,k}^{n} + P_{i-1,j,k}^{n}}{\Delta x^2},$$

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^{n} + \triangle t \frac{P_{i,j+1,k}^{n} - P_{i,j,k}^{n}}{\Delta y^2} + \triangle t \frac{-P_{i,j,k}^{n} + P_{i,j-1,k}^{n}}{\Delta y^2},$$

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^{n} + \triangle t \frac{P_{i,j,k+1}^{n} - P_{i,j,k}^{n}}{\Delta z^2} + \triangle t \frac{-P_{i,j,k}^{n} + P_{i,j,k-1}^{n}}{\Delta z^2}.$$

На базі розроблених чисельних моделей створено код Barrier-TX, мова програмування – FORTRAN. До складу коду входять:

–TVK0.DAT – файл початкових даних;

–TVK*1* – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку 3D-поля потенціалу швидкості в області дослідження;

–TVK*2* – підпрограма типу SUBROUTINE для визначення значення 3D-поля швидкості повітря в області дослідження;

–TVK3 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні рівняння для потенціалу швидкості;

–TVKA – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку рівняння масопереносу;

–TVK4 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні рівняння для масопереносу забруднюючих речовин;

–TVK5 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля концентрації забруднюючих речовин в області дослідження.

–T3AK – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку за методом Ейлера хімічної трансформації забруднювачів;

–T2AK – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку за методом Ейлера зміни концентрації забруднювачів внаслідок викиду з джерела.

Алгоритм розв’язання задачі такий:

1. У файл початкових даних вводиться інформація щодо розташування положення захисних бар’єрів, автомобілів на трасі, їхня геометрична форма, інтенсивність емісії забруднювачів, положення поглинальної поверхі та ін.

2. Здійснюється чисельний розв’язок 3D-рівняння для потенціалу швидкості.

3. Визначається 3D-поле швидкості потоку повітря в області дослідження.

4. Розраховується зміна концентрації забруднювачів внаслідок їхньої емісії.

5. Розраховується 3D-процес конвективного та дифузійного переносу забруднювачів в області дослідження.

6. Розраховується зміна концентрації забруднювачів внаслідок поглинання «TX Active» поверхнею.

7. Здійснюється друк поля концентрації забруднювачів у розрахунковій області для моменту часу $t^{n+1.}$.

8. Розрахунок повторюється для визначення розподілу концентрації забруднювачів для нового моменту часу t^{n+1}.

Вихідні дані для моделювання:

1. Форма бар'єру з «TX Active» поверхнею.
2. Форма та положення траси.
3. Положення автомобілів на трасі.
4. Положення «TX Active» поверхні на бар'єрі.
5. Положення захисного бар'єру відносно траси.
6. Інтенсивність емісії забруднювачів.
7. Швидкість повітряного потоку.

Для тестування розробленої чисельної моделі була чисельно розв'язана задача, що має аналітичний розв'язок. Ця задача використовується для верифікації чисельних моделей, що базуються на інтегрування нестаціонарного рівняння вигляду (2.37). Розглядається процес теплопровідності в тривимірній пластині, початкова температура якої дорівнює T_0, на усіх межах температура постійна та дорівнює 0. Аналітичний розв'язок задачі такий [89]:

$$T = T_0 \cdot (\mathrm{erf}(\frac{x}{2\sqrt{at}}) \cdot \mathrm{erf}(\frac{y}{2\sqrt{at}}) \cdot \mathrm{erf}(\frac{z}{2\sqrt{at}}).$$

Значення температури розраховується для точки x = 1 м, y = 1 м, z=1 м при a = 1, T_0=2300 ^{0}C. Розміри пластини 25 м × 25м× 25м.

У табл. 2.9 наведено результати розрахунку температури на базі аналітичного розв'язку та побудованої чисельної моделі.

Таблиця 2.9 – Тестування моделі

Час, с	Аналітичний розв'язок	Чисельний розв'язок (модель 1)	Чисельний розв'язок (модель 2)
9,76	13,11 ^{0}C	13,16^{0}C	13,20
12,76	8,71^{0}C	8,93^{0}C	8,95
17,30	5,52^{0}C	5,82^{0}C	5,84

Дані з табл. 2.9 свідчать про адекватність розробленої чисельної моделі.

Нижче наведено результати розв'язання задач з визначення ефективності використання захисного бар'єра з «ТХ Active» поверхнею. Моделювання виконувалося за таких вихідних даних: розміри розрахункової області 25 м × 25 м × 12 м; інтенсивність емісії Q_{NOx}=1 (у безрозмірному вигляді), з яких NO_2 становить 5 % від викиду NO_x, а NO – 95 %; швидкість повітря 5.2 м/с. У перерізі x=11 м, y=11 м розташований автомобіль, висота бар'єра 3 м (рис. 2.65).

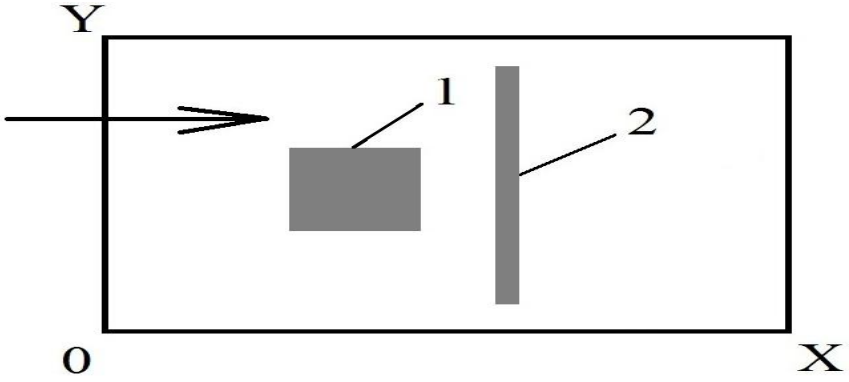


Рисунок 2.65 – Схема розрахункової області (переріз z=0,7 м):
1 – автомобіль; 2 – бар'єр з «ТХ Active» поверхнею.

Нижче наведено розрахункову схему (переріз *y*=12 м) для кожного сценарію дослідження ефективності використання вертикального бар'єра, що має «TX Active» поверхню:

1. Сценарій 1. Вертикальний бар'єр має «TX Active» поверхню тільки на навітряному боці (рис. 2.66).

2. Сценарій 2. Вертикальний бар'єр має «TX Active» поверхню на навітряному та на підвітряному боці (рис. 2.67).

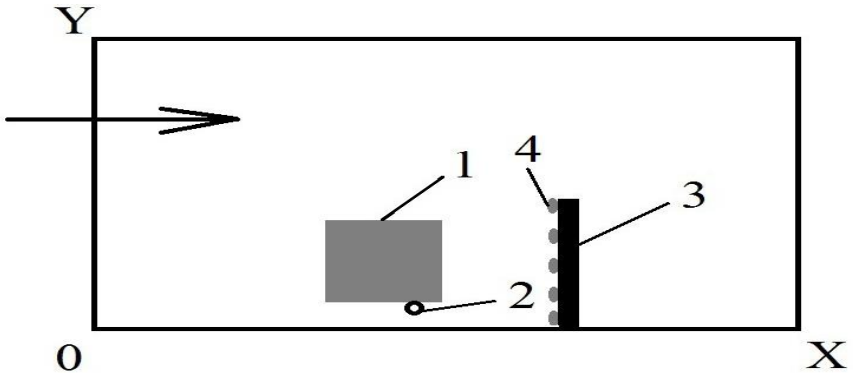


Рисунок 2.66 – Схема розрахункової області (сценарій 1):
1 – корпус автомобіля; 2 – місце емісії забруднювача; 3 – бар'єр; 4 – «TX Active» поверхня.

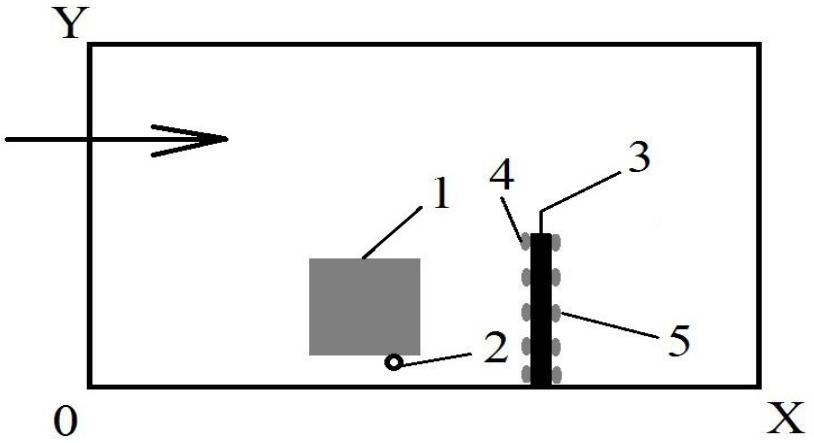


Рисунок 2.67 – Схема розрахункової області (сценарій 2):
1 – корпус автомобіля; 2 – місце емісії забруднювача; 3 – бар'єр; 4 – «TX Active» поверхня; 5 – «TX Active» поверхня.

Область забруднення (розподіл концентрації NO, безрозмірне значення $\times 10^2$) для перерізу y=12 м показана на рис. 2.68, 2.69.

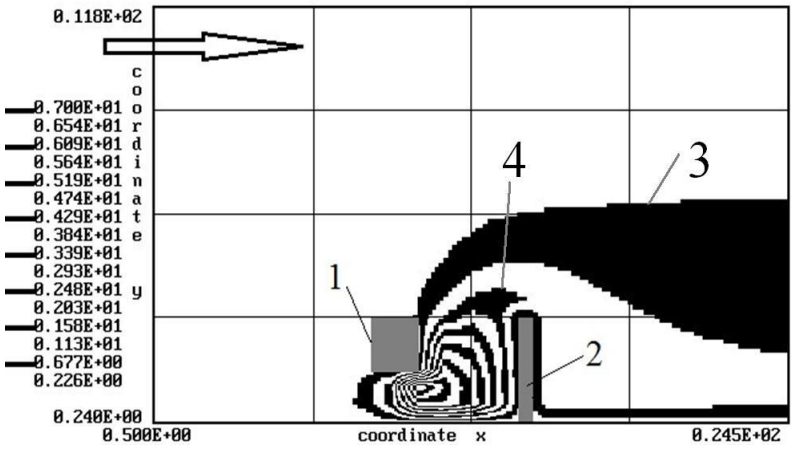


Рисунок 2.68 – Зона забруднення (сценарій 1):
1 – корпус автомобіля; 2 – бар'єр; 3 – C=0,67; 4 – C=1,50.

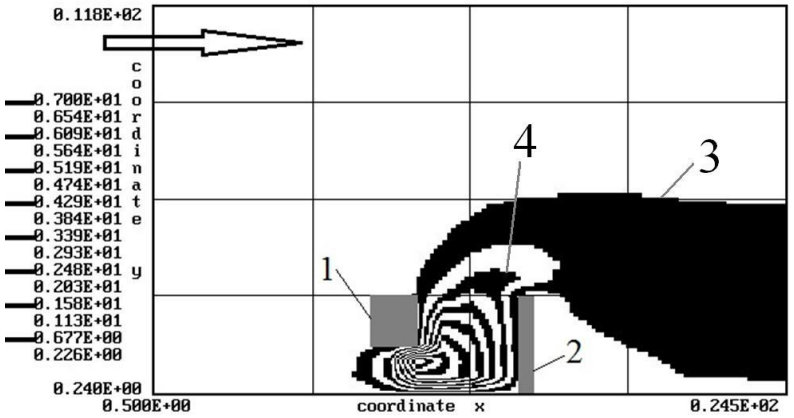


Рисунок 2.69 – Зона забруднення (сценарій 2):
1 – корпус автомобіля; 2 – бар'єр; 3 – C=0,67; 4 – C=1,50.

Якщо проаналізувати концентраційні поля, наведені на цих рисунках, можна побачити таку закономірність: при використанні «TX Active» поверхні (сценарій 2) концентрація біля цієї поверхні дорівнює нулю.

Для визначення впливу «TX Active» поверхні на зниження концентрації домішки в робочий зоні за бар'єром у табл. 2.10 наведено

безрозмірне значення концентрації *NO* у цій робочий зоні на висоті 1.5 м та на різній відстані.

Таблиця 2.10 – Значення концентрації *NO* в робочий зоні

Відстань від бар'єра, м	Базовий (бар'єр без «TX Active» поверхні)	Сценарій 1 («TX Active» поверхня лише з одного боку бар'єра)	Сценарій 2 («TX Active» поверхня з двох боків бар'єра)
1,5	0,0153	0,0087	0,0012
2,5	0,0146	0,0083	0,0018
3,5	0,0140	0,0080	0,0022
4,5	0,0135	0,0077	0,0024
5,5	0,0126	0,0075	0,0025

Як ми бачимо з цієї таблиці, використання «TX Active» поверхні дає можливість суттєво зменшити концентрацію забруднювача в робочий зоні. Так, для сценарію 2 на відстані 5.5 м від захисного бар'єра концентрація домішки майже в 5 разів нижча, ніж для сценарію 1.

На рис. 2.70 у графічному вигляді показано зміну концентрації (безрозмірної) в робочий зоні за бар'єром на висоті 1.5 м для сценарію 2.

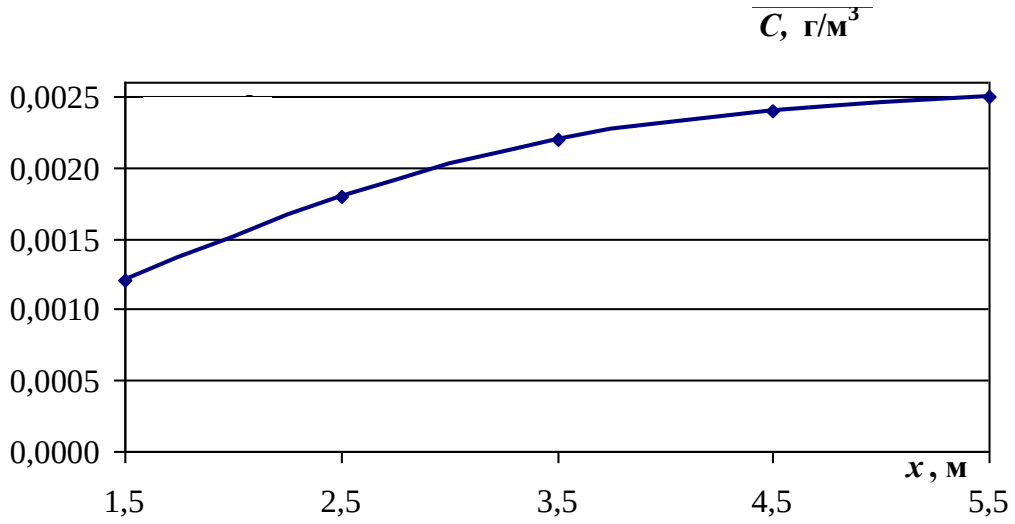


Рисунок 2.70 – Зміна концентрації домішки в робочий зоні за бар'єром (сценарій 2)

З рис. 2.70 можна бачити, що активне зростання концентрації домішки за бар'єром починається з позначки порядку x=2,5 м. Тобто «захисний вплив» бар'єру спостерігається в межах до 2,5 м.

2.5 Використання «TX Active» поверхні на будівлях для зниження рівня хімічного забруднення в робочих зонах

Ідея використання «photocatalytic» поверхонь («TX Active») для зниження рівня хімічного забруднення в робочих зонах була запропонована за кордоном і впроваджена у вигляді покриття для різних будівель. Наприклад, на рис. 2.71 показано майданчик біля гаражів, де є викиди різних шкідливих речовин. На цьому майданчику побудовано будівлю з використанням таких поверхонь.

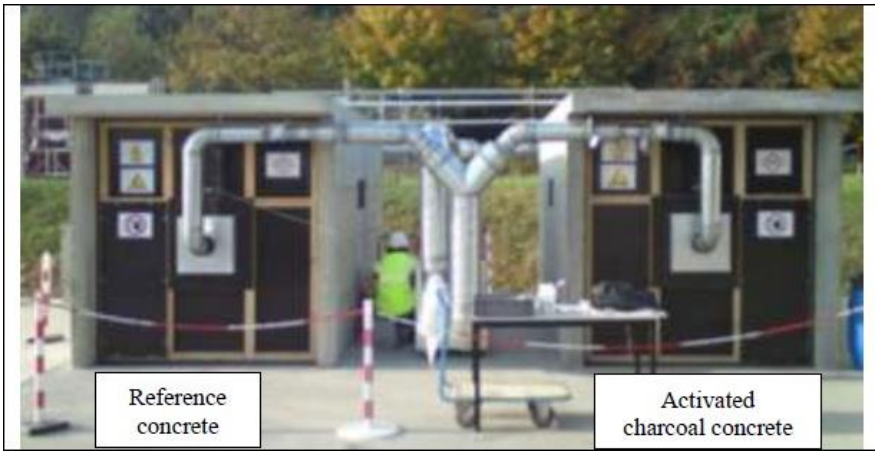


Рисунок 2.71 – Будівля гаража з «TX Active» поверхнею (праворуч) [168]

Проєктуючи будівлі з такими поверхнями, необхідно визначити ефективність зниження концентрації забруднювача в робочих зонах. Але ефективність використання «TX Active» поверхонь залежить від багатьох факторів: висоти будівлі, розташування будівель відносно джерела забруднення, швидкості повітря тощо. У зв'язку із цим для практики дуже

важливим є створення математичних моделей, що дозволяють адекватно визначити ефективність цих поверхонь для захисту робочих зон від забруднення. Для розв'язання цієї задачі було побудовано математичну модель, яка складається з таких рівнянь механіки суцільного середовища [77, 109]:

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial uS}{\partial x}+\frac{\partial vS}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial S}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial S}{\partial y}\right)+$$
$$+\sum_{i=1}^{N}Q_i\delta(x-x_i)\delta(\text{y}-y_i)$$

(2.37)

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}=0\,, \qquad (2.38)$$

$$u=\frac{\partial P}{\partial x}\;v=\frac{\partial P}{\partial y}\,. \qquad (2.39)$$

де S – концентрація забруднювача;

u, v – проєкції вектора швидкості повітряного потоку на осі декартової системи координат;

μ_x,μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії;

$Q_i(t)$ – інтенсивність емісії з забруднювача (t – час);

x_i, y_i – координати джерела емісії;

$\delta(x-x_i),\delta(y-y_i)$ – дельта-функція Дірака;

P – потенціал швидкості.

Граничні умови для моделюючих рівнянь [109]:

1. $\frac{\partial P}{\partial n}=0$ – на непроникливих межах.

2. $\frac{\partial P}{\partial n}=0$ – на верхній межі.

3. $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$ – на межі, де потік входить до розрахункової області, (V_n – швидкість повітряного потоку).

4. P=const – на межі, де потік «виходить» із розрахункової області.

5. На межі, де потік входить у розрахункову область: $S = 0$.

6. На межі, де потік «виходить» із розрахункової області: $\left.\frac{\partial S}{\partial n}\right|_{\Gamma_2} = 0.$

7. На межі $y = 0$ та $y = L_y$ (L_y – верхня межа області):

$$\frac{\partial S}{\partial n} = 0,$$

де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні.

Для моменту часу $t = 0$ початкова умова записується так: $S = 0$.

Для моделювання процесу поглинання «TX Active» поверхнею будемо використовувати на цій поверхні таку граничну умову (для концентрації *NO):*

$$S=0.$$

Процедура розрахунку поглинання забруднювача поверхнею описана раніше (п. 2.4).

Для розв’язання рівняння для потенціалу швидкості запишемо його таким чином [100]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \qquad (2.40)$$

де t – фіктивний час.

Далі для рівняння (2.40) здійснимо геометричне розщеплення [100]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \tag{2.41}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \tag{2.42}$$

Розрахункова залежність (явна різницева схема) для визначення невідомого значення P на базі рівняння (2.41) має вигляд [99]:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \triangle t \frac{P_{i+1,j}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \triangle t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2}.$$

Розрахункова залежність (явна різницева схема) для визначення невідомого значення P на базі рівняння (2.42) має вигляд [99]:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \triangle t \frac{P_{i,j+1}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta y^2} + \triangle t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}.$$

Оскільки розв’язується еволюційне рівняння, то розрахунок за цими залежностями закінчується тоді, коли виконується умова

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n} \right| \le \varepsilon \ ,$$

де ε – мале число;

n – номер ітерації.

Швидкість потоку розраховується таким чином:

$$u = \frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{\Delta x} \qquad v = \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j}}{\Delta y}.$$

Для чисельного розв’язку рівняння переносу забруднювача здійснимо його геометричне розщеплення та розщеплення за фізичними процесами:

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial uS}{\partial x}=0$$

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial vS}{\partial y}=0 \qquad (2.43)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial S}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial S}{\partial y}\right)+\frac{\partial S}{\partial t}=\sum_{i=1}^{N}Q_i\delta(x-x_i)\delta(\mathrm{y}-y_i).$$

Для чисельного інтегрування першого рівняння з (2.43) застосовується така двокрокова схема розщеплення [109]:

- на першому кроці використовується залежність:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}=S_{i,j}^{n}-\Delta t\frac{u_{i+1,j}^{+}S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}-u_{i,j}^{+}S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x},$$

- на другому кроці використовується залежність:

$$S_{i,j}^{n+1}=S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}-\Delta t\frac{u_{i+1,j}^{-}S_{i+1,j}^{n+1}-u_{i,j}^{-}S_{i,j}^{n+1}}{\Delta x},$$

де $u^{+}=\dfrac{u+|u|}{2}$, $u^{-}=\dfrac{u-|u|}{2}$.

Для чисельного розв’язання першого та другого рівняння із системи (2.43) застосовується така двокрокова схема розщеплення:

- на першому кроці використовується залежність:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^{n} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^{+} S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^{+} S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y},$$

- на другому кроці використовується залежність:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^{-} S_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^{-} S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y},$$

де $v^{+} = \frac{v + |v|}{2}$, $v^{-} = \frac{v - |v|}{2}$.

Для розв'язання третього рівняння із системи (2.43) (рівняння переносу за рахунок дифузії) виконаємо його геометричне розщеплення таким чином:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x}\right), \tag{2.44}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y}\right). \tag{2.45}$$

Розрахункова залежність (явна різницева схема) для визначення невідомого значення концентрації з рівняння (2.44) має вигляд [100]:

$$C_{i,j}^{n+1} = C_{i,j}^{n} + \triangle t \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n} - C_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \triangle t \mu_x \frac{-C_{i,j}^{n} + C_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2}.$$

Розрахункова залежність (явна різницева схема) для визначення невідомого значення концентрації з другого рівняння із системи (2.45) має вигляд:

$$C_{i,j}^{n+1} = C_{i,j}^{n} + \triangle t \mu_y \frac{C_{i+1,j}^{n} - C_{i,j}^{n}}{\Delta y^2} + \triangle t \mu_y \frac{-C_{i,j}^{n} + C_{i-1,j}^{n}}{\Delta y^2}.$$

Тобто невідоме значення концентрації визначається за явною формулою.

Для чисельного розв'язання останнього рівняння із системи (2.43) використовується метод Ейлера [100].

На базі розробленої чисельної моделі створено код WALL-TX, мова програмування – FORTRAN. До складу коду входять:

– Wa0.DAT – файл початкових даних;

– WaK1 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку 2D поля потенціалу швидкості в області дослідження;

– WaK2 – підпрограма типу SUBROUTINE для визначення значення 2D поля швидкості повітря в області дослідження;

– WaK3 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв'язанні рівняння для потенціалу швидкості;

– WaKA – підпрограма типу SUBROUTINE для розв'язання рівняння масопереносу за рахунок конвекції;

– WaK2A – підпрограма типу SUBROUTINE для розв'язання рівняння масопереносу за рахунок дифузії;

– WaK4 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв'язанні рівняння для масопереносу забруднюючих речовин;

– WaK5 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля концентрації забруднюючих речовин в області дослідження;

– WaT – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку за методом Ейлера зміни концентрації забруднювача під дією джерела викиду.

Алгоритм розв'язання задачі такий:

1. У файл початкових даних вводиться інформація щодо розташування будівель у розрахунковій області, положення «TX Active» поверхонь на

будівлях, геометрична форма будівель, інтенсивність емісії забруднювачів тощо.

2. Здійснюється чисельне розв’язання 2D-рівняння для потенціалу швидкості.

3. Визначається 2D-поле швидкості потоку повітря в області дослідження.

4. Розраховується зміна концентрації забруднювачів внаслідок їхньої емісії.

5. Розраховується 2D-процес конвективного та дифузійного переносу забруднювачів у області дослідження.

6. Розраховується зміна концентрації забруднювачів внаслідок поглинання «TX Active» поверхнею на будівлях.

7. Здійснюється друк поля концентрації забруднювачів у розрахунковій області для моменту часу $t^{n+1.}$.

8. Розрахунок повторюється для визначення розподілу концентрації забруднювачів для нового моменту часу t^{n+1}.

Вихідні дані для моделювання:

1. Дані щодо положення «TX Active» поверхні на будівлях.
2. Форма та положення джерела забруднення.
3. Форма та положення будівель.
4. Інтенсивність емісії забруднювачів.
5. Швидкість повітряного потоку.

Для тестування розробленої чисельної моделі була чисельно розв’язана задача, що має аналітичний розв’язок. Ця задача використовується для верифікації чисельних моделей, що базуються на інтегруванні нестаціонарного рівняння вигляду (2.22). Розглядається процес теплопровідності у двовимірній пластині, початкова температура якої дорівнює 0, на усіх межах температура постійна та дорівнює T_0. Аналітичний розв’язок задачі такий [89]:

$$T = T_0 \cdot (1 - \mathrm{erf}(\frac{x}{2\sqrt{at}}) \cdot \mathrm{erf}(\frac{y}{2\sqrt{at}})).$$

Значення температури розраховується для точки x=1 м, y=1 м при a=1, T_0=3200^{0}C. Розміри пластини 25 м × 25 мм.

У табл. 2.11 наведено результати розрахунку температури на базі аналітичного розв'язку та побудованої чисельної моделі.

Як можна бачити з табл. 2.11, маємо задовільне узгодження аналітичного та чисельного розв'язків.

Таблиця 2.11 – Результати верифікації моделі

Час, с	Розрахунок на базі аналітичного розв'язку	Розрахунок на базі розробленої моделі
9,76	3097,46	3097,88
12,76	3122,12	3122,62
17,30	3142,40	3142,51

Далі наведено результати розв'язання задачі з визначення ефективності використання «TX Active» поверхней на будівлях для зменшення рівня хімічного забруднення в робочих зонах. Моделювання виконувалося за таких вихідних даних: розміри розрахункової області 25 м х 12 м; інтенсивність емісії Q_{NOx}=0.3 г/с, з якої NO_2 становить 5 % від викиду NO_x, а NO – 95 %; швидкість повітря 6 м/с. У перерізі x=11м є автомобіль, висота будівлі 6м (рис. 2.72).

Розрахунок виконувався для двох сценаріїв (рис. 2.72):

1. «TX Active» поверхні немає на промислових будівлях, сценарій 1.

2. «TX Active» поверхня розміщена на промислових будівлях (поверхні AB, CD, рис. 2.72), сценарій 2.

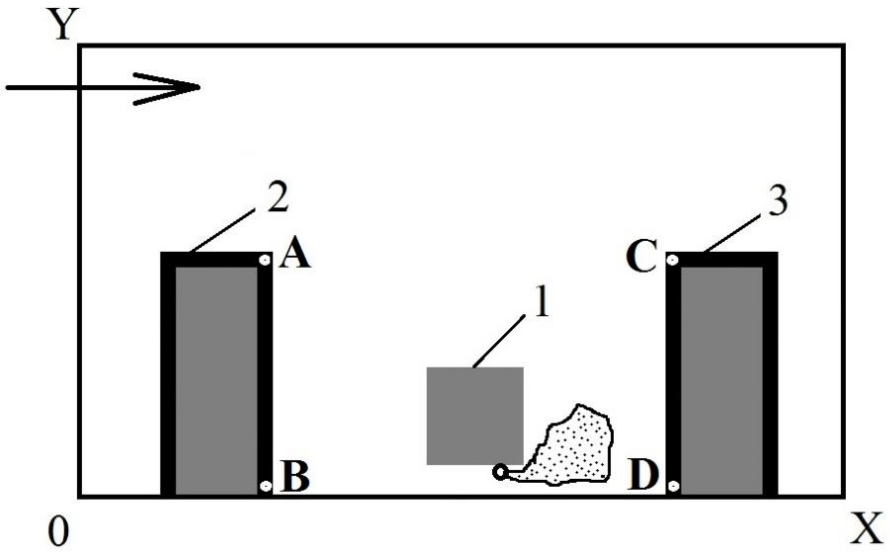


Рисунок 2.72 – Розрахункова область:
1 – місце емісії; 2, 3 – будинки; AB, CD – «TX Active» поверхня.

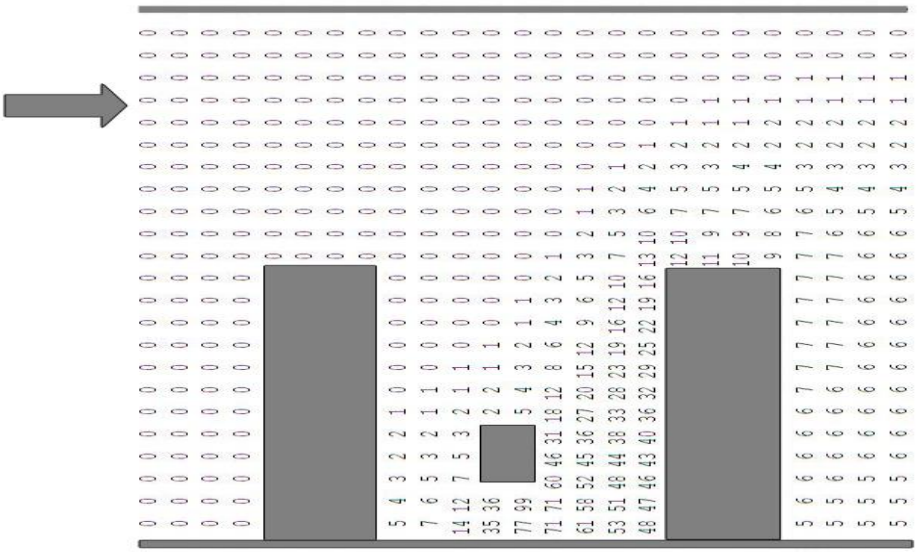


Рисунок 2.73 – Розподіл концентрації *NO* («TX Active» поверхня не використовується)

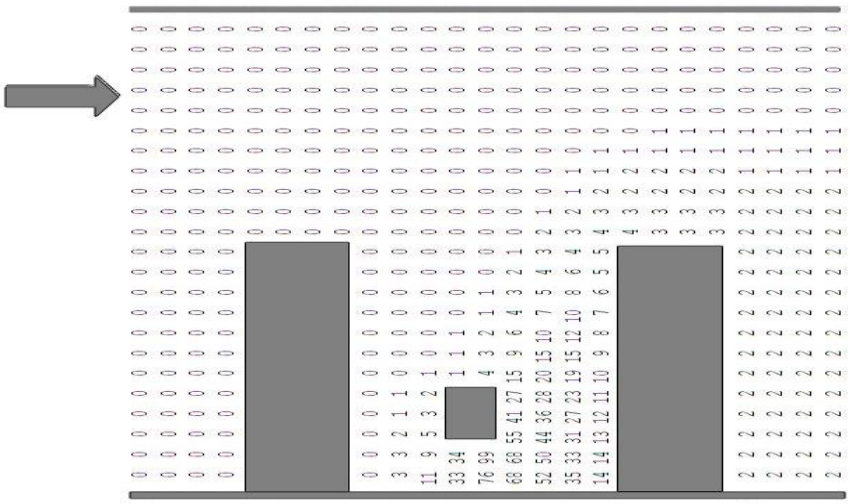


Рисунок 2.74 – Розподіл концентрації *NO* («ТХ Active» поверхня використовується)

Слід зауважити, що для виконання системного аналізу впливу «ТХ Active» поверхні на зниження рівня забруднення повітря в робочих зонах розрахункові дані подані у форматі «INTENGER». Кожне число демонструє значення концентрації у відсотках від максимальної концентрації в розрахунковій області. Максимальна концентрація «99%» (C_{max}=0.11г/м^3) виявлена біля автомобіля, де є викид забруднювача.

Аналіз концентраційних полів *NO* на наведених рисунках показує, що за відсутності «ТХ Active» поверхні концентрація на поверхні другої будівлі змінюється від 48 % до 16 %. Біля першої будівлі концентрація змінюється від 5 % до 1 %. Але у разі використання «ТХ Active» поверхні концентрація на поверхні другої будівлі змінюється від 14 % до 5 %. Біля першої будівлі концентрація дорівнює 0. Таким чином, використання «ТХ Active» поверхні у будівлях дозволе суттєво зменшити рівень забруднення повітря в робочих зонах.

Зауважимо, що час розрахунку становить 7 с.

2.6 Оцінка ефективності використання бар'єрів для зниження шумового забруднення в робочих зонах

Доставка вугілля на великі ТЕС здійснюється залізничним транспортом (рис. 2.75). Шум від залізничного транспорту негативно впливає на працівників підприємства. Тому виникає проблема з мінімізації шумового забруднення в транспортному коридорі.

Рисунок 2.75 – Транспортування вугілля залізничним транспортом (фото: https://voxukraine.org/wp-content/uploads/2015/10/17-1024x576-1-1.jpg)

Слід зауважити, що в рамках цієї проблеми виокремлюють дві важливі задачі. Перша задача – це прогнозування рівня шумового забруднення біля транспортного коридору, друга – зменшення шумового забруднення біля транспортного коридору.

Існуючі в Україні прогнозні моделі для оцінювання рівня шуму базуються на емпіричних формулах, отриманих для конкретних умов, і ці моделі не враховують деяких важливих факторів [183]. Наприклад, рівень шуму від вантажного потяга розраховується таким чином [85]:

$$L_{Амакс} = 79,4 + \Delta L_{Астик} + 0,233V, \qquad (2.46)$$

де $L_{Астик}$ – доданок, що враховує тип колії;

V – середня швидкість потяга [85].

Рівень шуму від пасажирського потяга розраховується із такої залежності [85]:

$$L_{Амакс} = 82,4 + \Delta L_{Астик} + 0,12V. \qquad (2.47)$$

Також подібні емпіричні залежності мають додаткові елементи, що враховують вплив, наприклад, рельєфу місцевості на рівень шумового забруднення. Але потрібно наголосити, що емпіричні моделі цього класу визначають рівень шуму лише в деякій точці, що розташована на певній відстані від джерела (наприклад, на відстані 25 м). Тому недоліком таких моделей є неможливість визначення рівня шуму в інших точках та неможливість отримання поля акустичного тиску біля траси. Крім цього, рельєф місцевості або інші перешкоди суттєво впливають на формування поля акустичного тиску внаслідок інтерференції звукових хвиль.

Отже, емпіричні моделі можна використовувати для первинного аналізу зон шумового забруднення від різних джерел.

Важливим є те, що зараз в Україні відсутні методи оцінювання ефективності використання шумозахисних екранів на залізниці (рис. 2.76), тобто відсутнє наукове обґрунтування вибору параметрів екранів для конкретних ділянок залізниці. У зв’язку із цим створення методів для визначення зміни шумового навантаження на робочі зони в разі використання екранів має особливо важливе значення.

Рисунок 2.76 – Захисний екран біля залізниці
(фото: https://www.heringinternational.com/en/news/detail/n/hering-noise-protection-walls-for-the-railway-bridge-roermonder-road-aachen/)

У цій роботі чисельна модель розроблена для розв’язання таких задач:

1. Прогнозування шумового забруднення робочих зон біля залізничної колії.

2. Оцінювання рівня шумового забруднення в разі використання шумозахисних екранів прямокутної форми.

3. Оцінювання рівня шумового забруднення в разі використання шумозахисних екранів складної геометричної форми.

4. Оцінювання рівня шумового забруднення в разі використання шумозахисних екранів з урахуванням рельєфу місцевості, де проходить залізниця.

Модель побудовано на чисельному інтегруванні хвильового рівняння для акустичного тиску.

Для визначення поля акустичного тиску в розрахунковій області будемо використовувати таке рівняння акустики:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right), \qquad (2.48)$$

де P – тиск;

t – час;

a – швидкість поширення звуку;

x, y – декартові координати.

Зауважимо, що параметр a комплексно враховує довжину хвилі та частоту.

Для рівняння акустики ставляться такі крайові умови: P=0 – на початок розрахунку; P=0 – на правій та лівій межах розрахункової області; $\partial P/\partial n$=0 – на твердих межах та верхній межі (n – одинична зовнішня нормаль до межі).

У рамках поставленої крайової задачі неможливо отримати аналітичний розв'язок рівняння акустики (2.48). Тому для розв'язання задачі використовується скінченно-різницева двошарова різницева схема [178]:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i,j}^{n-1}}{\Delta t^2} = a^2 \frac{P_{i+1,j}^{n} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2} + a^2 \frac{P_{i,j+1}^{n} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2} \qquad (2.49)$$

Ця різницева схема є явною, для її використання потрібно на початку розрахунку задати акустичний тиск для двох моментів часу: t^{n-1}, t^{n}. Невідоме значення акустичного тиску на кожному часовому кроці t^{n+1} визначається за такою залежністю:

$$P_{i,j}^{n+1} = 2P_{i,j}^{n} + P_{i,j}^{n-1} + a^2 \frac{P_{i+1,j}^{n} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2} \Delta t^2 + a^2 \frac{P_{i,j+1}^{n} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2} \Delta t^2.$$

Особливо важливим питанням у цьому класі задач є формування вигляду розрахункової області в чисельній моделі. Для цього будемо використовувати метод «porosity technique», тобто формування вигляду розрахункової області за допомогою маркерів. На рис. 2.76 показано, як це реалізується, а саме: на прямокутній сітці «відокремлюються» та кодуються різницеві комірки, що «відповідають» за тверді стінки або інші межі

розрахункової області. Такий підхід дозволяє на практиці дуже швидко формувати вигляд розрахункової області: форму рельєфу (насип, виїмка), положення та геометричну форму шумозахисних бар'єрів. За допомогою методу маркування зменшується час на підготовку даних для виконання обчислювального експерименту.

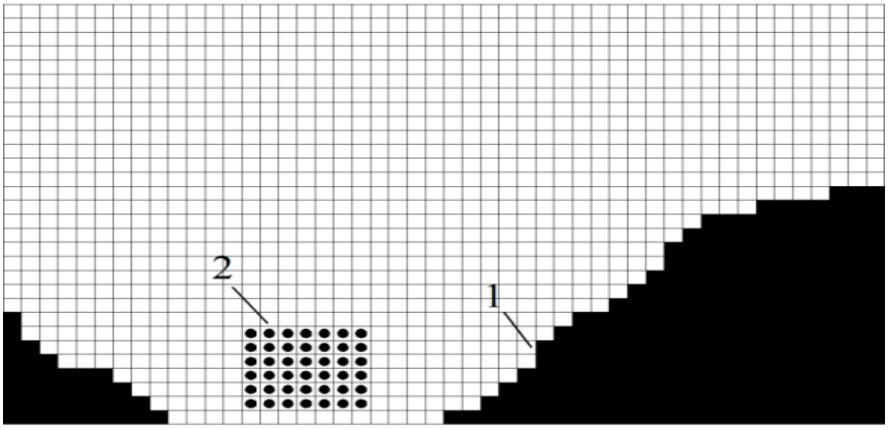


Рисунок 2.77 – Схема маркування розрахункової області:
1 – межі рельєфу; 2 – маркери, що «відповідають» за положення джерела шумового забруднення.

Дуже важливим аспектом є те, що за допомогою маркерів у розробленій чисельній моделі формується положення джерела шуму, «виокремлюється» зона, де розташований локомотив, тощо. У цій зоні у вигляді набору точок задається акустичний тиск *P* від джерела шуму (наприклад, за даними експериментальних вимірів). Тобто під час обчислювального експерименту на базі розробленої чисельної моделі для «відтворення» джерела шуму використовується внутрішня гранична умова у вигляді умови Діріхле.

На базі розробленої чисельної моделі створено код АК-*2D*, мова програмування – FORTRAN. До складу коду входять:

–AK0.DAT – файл початкових даних;

–AK*1* – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку поля акустичного тиску для різних моментів часу;

–AK*2* – підпрограма типу FUNCTION для визначення значення акустичного тиску в точці розташування реципієнта;

–AK3 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов;

–WAK2 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля акустичного тиску в області дослідження.

Алгоритм розв’язання задачі такий:

1. У файл початкових даних вводиться інформація щодо форми рельєфу, положення шумозахисних бар’єрів тощо.

2. Здійснюється чисельне розв’язання рівняння акустики та визначається поле акустичного тиску для моменту часу t^{n+1}.

3. Визначається значення акустичного тиску в точці розташування реципієнта.

4. Здійснюється друк поля акустичного тиску в розрахунковій області для моменту часу $t^{n+1.}$.

5. Розрахунок повторюється для визначення поля акустичного тиску для нового моменту часу.

Вихідні дані для моделювання:

1. Форма рельєфу.

2. Форма шумозахисного бар’єра.

3. Положення шумозахисного бар’єра.

4. Акустичний тиск від джерела забруднення.

5. Положення реципієнта.

Далі наведено результати розв’язання двох задач з визначення ефективності використання захисних бар’єрів: перша задача – оцінка ефективності використання шумозахисних бар’єрів для зниження рівня шуму від потяга, коли він перебуває у виїмці; другий – оцінка ефективності

використання шумозахисних бар’єрів для зниження рівня шуму від потяга, коли він перебуває на насипу.

На рис. 2.78 показана схема формування розрахункової області. У зоні розташування локомотива за допомогою маркерів задається значення акустичного тиску P=100 (безрозмірне значення).

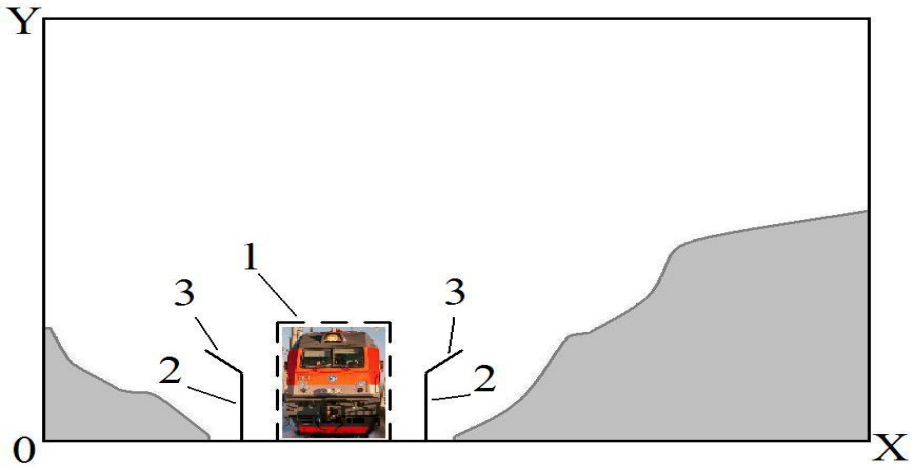


Рисунок 2.78 – Схема розрахункової області:
1 – внутрішня межа для джерела шуму; 2 – шумозахисний бар’єр; 3 – додатковий елемент.

Під час обчислювального експерименту (задача 1 – потяг перебуває у виїмці) приймалось, що швидкість звуку дорівнювала 340 м/с. Розміри розрахункової області 55 м х 22 м, висота шумозахисного бар’єра 5 м. Додатковий елемент на вертикальному бар’єрі має ухил 45^0 та довжину 2 м.

Далі на рисунках показано поле акустичного тиску для моменту часу t=0.008 с для першої задачі. Зона акустичного тиску показана для трьох варіантів: коли немає шумозахисних бар’єрів (варіант 1), у разі використання вертикальних шумозахисних бар’єрів (варіант 2) та у випадку, коли вертикальні шумозахисні бар’єри мають додатковий елемент (варіант 3). Зауважимо, що там, де перебуває локомотив, рівень шуму дорівнює 100 %.

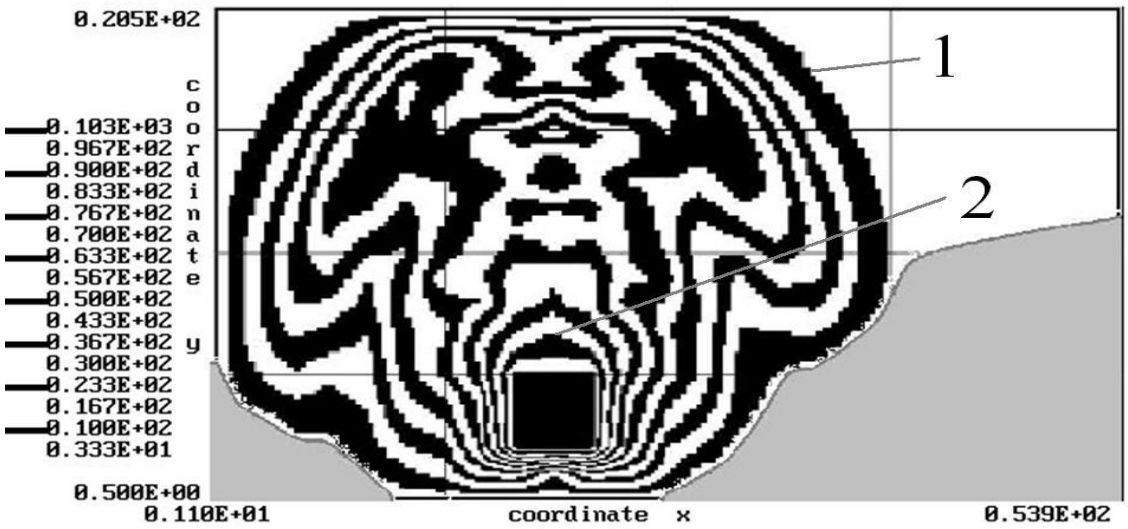


Рисунок 2.79 – Поле акустичного тиску (варіант 1: немає шумозахисних бар’єрів):

1 – *P*=10 %; 2 – *P*=90 %.

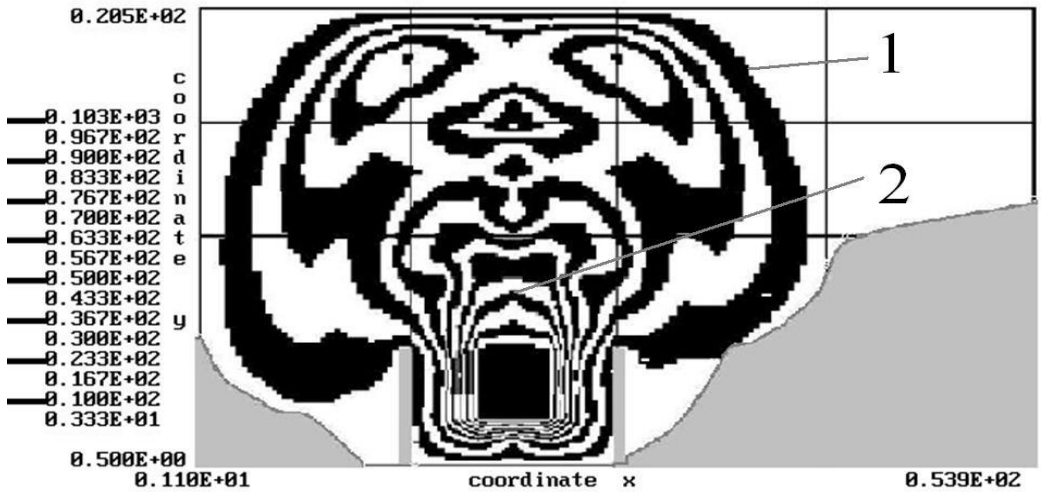


Рисунок 2.80 – Поле акустичного тиску (варіант 2: використовується вертикальний шумозахисний бар’єр):

1 – *P*=10 %; 2 – *P*=76 %.

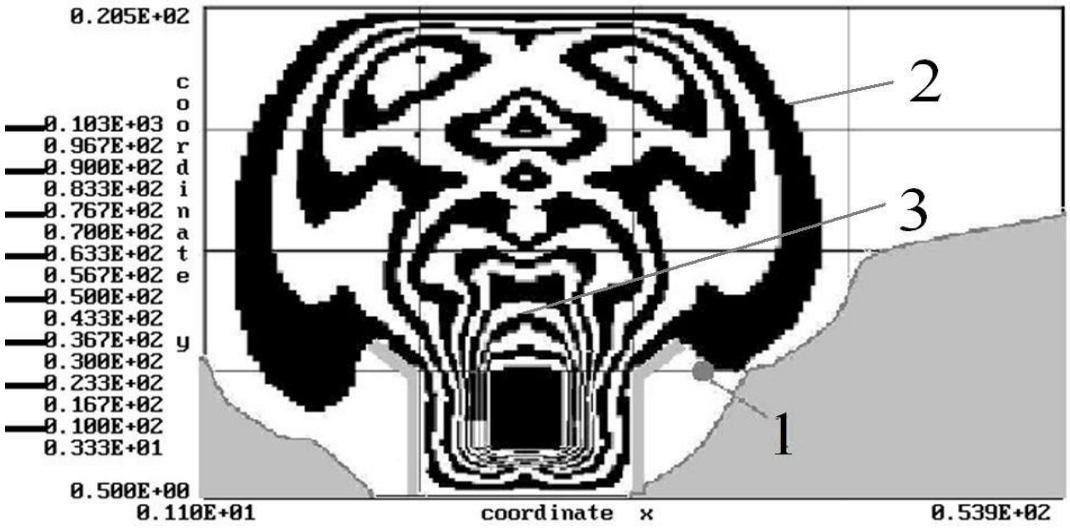


Рисунок 2.81 – Поле акустичного тиску (варіант 3: використовується вертикальний шумозахисний бар’єр з додатковим елементом):
1 – точка визначення акустичного тиску; 2 – *P*=10 %; 3 – *P*=76 %.

Як ми бачимо з наведених рисунків, інтерференція звукових хвиль створює складну картину розподілу акустичного тиску в області дослідження. У розрахунковій області можливо виокремити дві підзони. Перша – це область між шумозахисними бар’єрами. У цій області чітко виділяється зона розташування джерела шуму та значний градієнт акустичного тиску. Друга зона – це область за межами розташування шумозахисних бар’єрів, що змінюється для кожного варіанта задачі.

У табл. 2.12 показано значення акустичного тиску (у відсотках) у точці на відстані 4 м від шумозахисного бар’єра та на висоті 5 м.

Як бачимо з табл. 2.12, використання шумозахисних бар’єрів дозволяє знизити рівень акустичного тиску біля залізниці. Інтенсивність зниження можна прогнозувати на базі розробленої чисельної моделі.

Далі наведено результати розв’язання другої задачі (потяг перебуває на насипу, рис. 2.82).

Таблиця 2.12 – Значення акустичного тиску у відсотках від максимальної величини в розрахунковій області

Варіант	1	2	3
Акустичний тиск	7,8	3,9	2,7

Нижче на рисунках показано поле акустичного тиску для моменту часу t=0,03 с. Зона акустичного тиску показана для трьох варіантів: немає шумозахисних бар'єрів (варіант 1), у разі використання вертикальних шумозахисних бар'єрів висотою h=3 м (варіант 2) та у разі використання вертикальних шумозахисних бар'єрів висотою h=5 м (варіант 3). У ході обчислювального експерименту приймалося, що швидкість звуку дорівнювала 340 м/с. Розміри розрахункової області 55 м х 22 м.

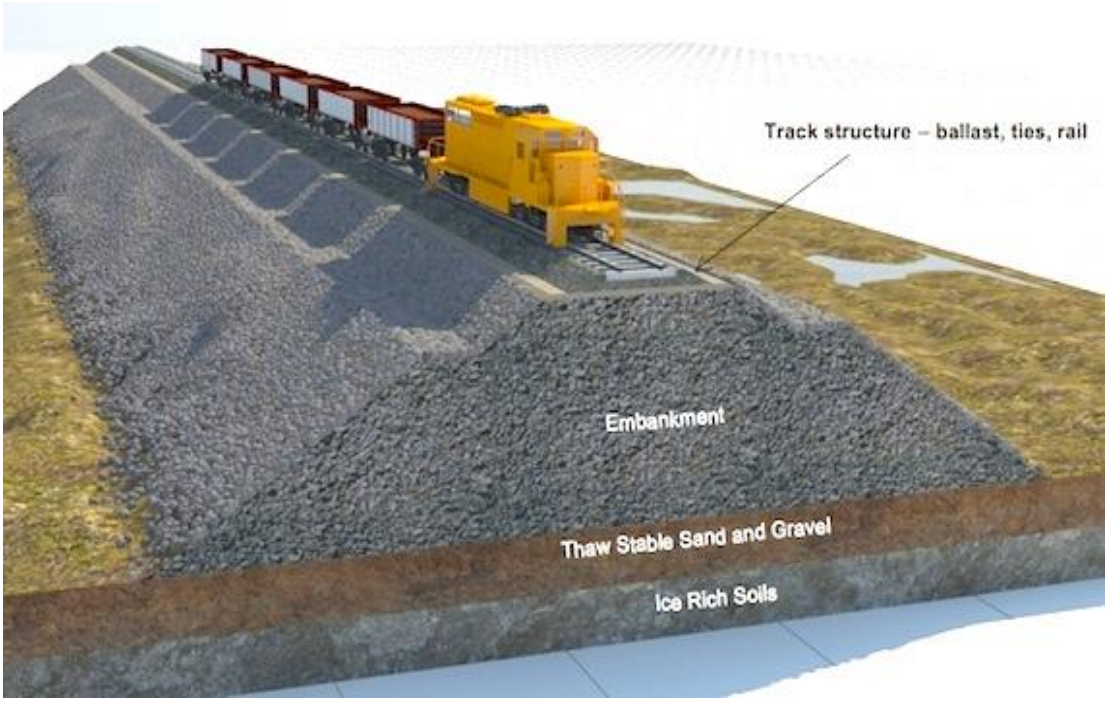


Рисунок 2.82 – Схема розташування потяга на насипу (фото: https://nunatsiaq.com/stories/article/65674baffinland_railway_may_be_dead_pond_inlet_group_declares/)

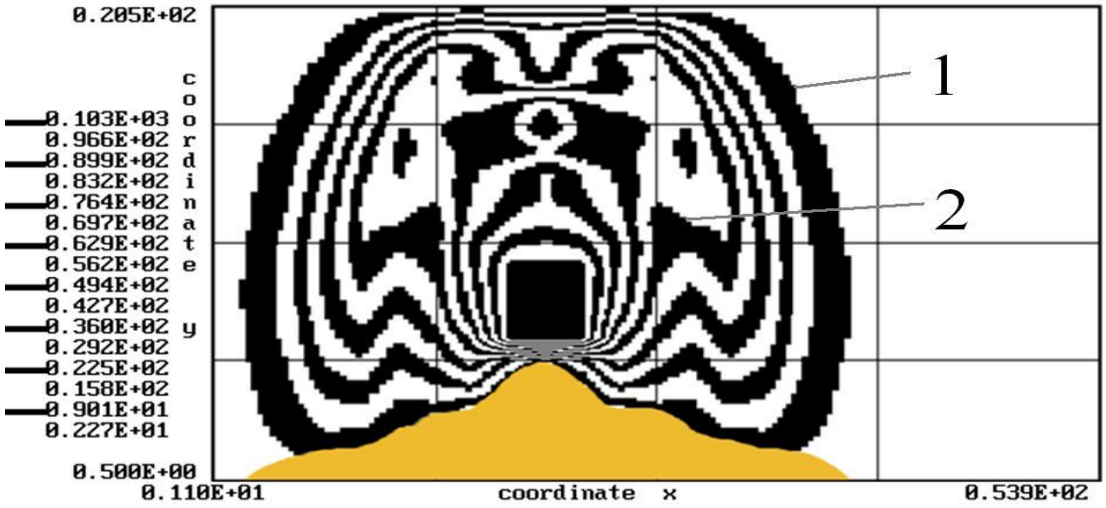


Рисунок 2.83 – Поле акустичного тиску (варіант 1: немає шумозахисних бар’єрів):

1 – *P*=90 %; 2 – *P*=49 %.

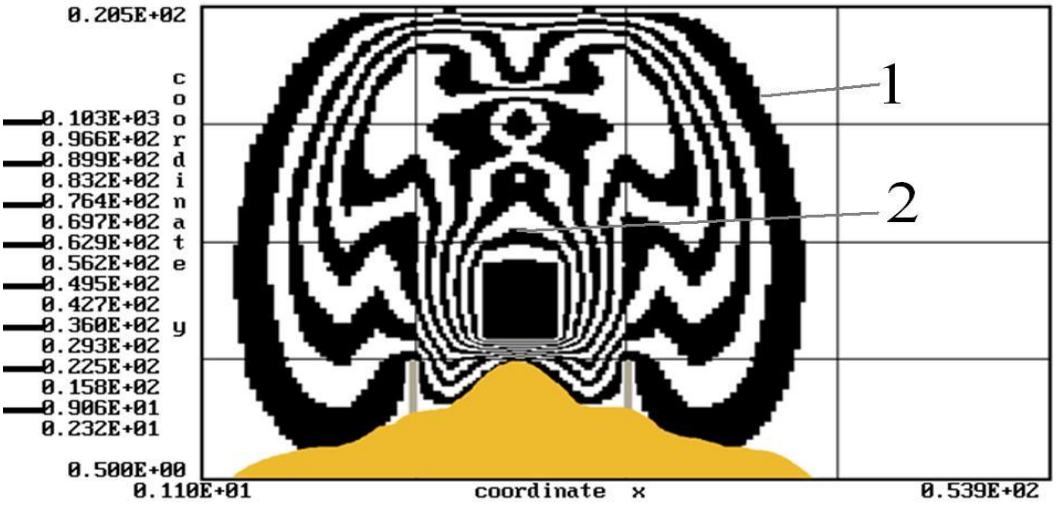


Рисунок 2.84 – Поле акустичного тиску (варіант 2: вертикальний шумозахисний бар’єр, *h*=3 м):

1 – *P*=90 %; 2 – *P*=89 %.

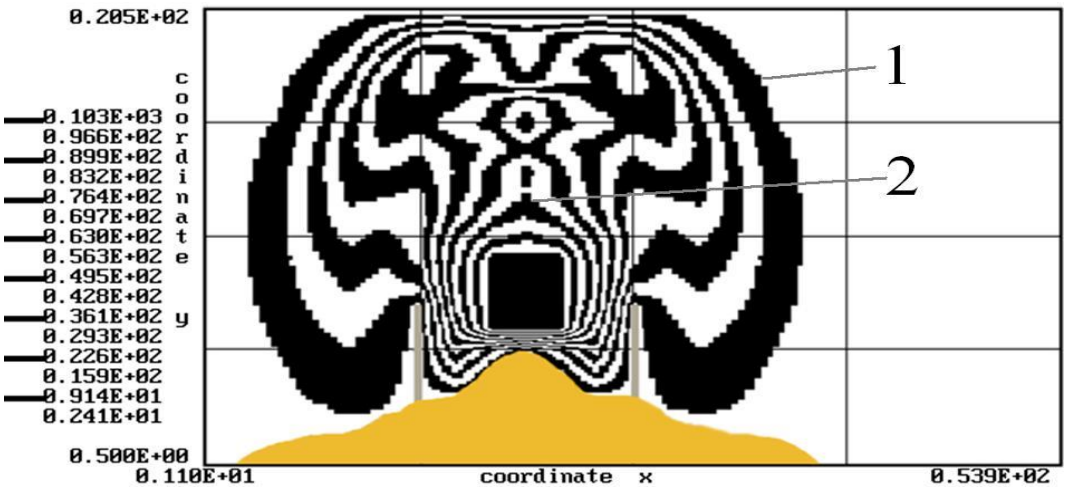


Рисунок 2.85 – Поле акустичного тиску (варіант 3: вертикальний шумозахисний бар’єр, *h*=5м):
1 – *P*=91 %; 2 – *P*=76 %.

З наведених рисунків можна бачити, що за рахунок інтерференції звукових хвиль виникає складна картина розподілу акустичного тиску в області дослідження.

У табл. 2.13 наведено значення акустичного тиску, у відсотках, на різній відстані від насипу та на висоті 2 м.

Таблиця 2.13 – Значення величини нормованого акустичного тиску у відсотках від максимального значення в розрахунковій області

Сценарій	Акустичний тиск на відстані від насипу		
	2 м	4 м	6 м
Немає бар’єра	2,81	7,73	8,78
Бар’єр 3 м	2,27	4,92	4,75
Бар’єр 5 м	1,61	2,18	1,46

Як можна переконатися з табл. 2.13, використання шумозахисних бар’єрів дозволяє знизити рівень акустичного тиску біля залізниці.

Далі наведені результати розв’язання іншої задачі: прогнозування поля акустичного тиску біля залізниці в умовах рівній місцевості та використання прямокутних шумозахисних екранів. Розглядається ділянка залізниці, де розташовані два локомотиви. Схема розрахункової області показана на рис. 2.85.

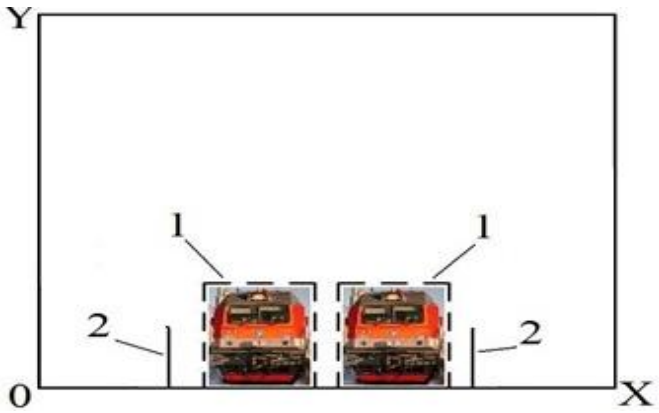


Рисунок 2.86 – Схема розрахункової області:
1 – внутрішня межа для джерела шуму; 2 – шумозахисний бар’єр.

На рис. 2.87 показано, як за допомогою маркерів (метод «porosity technique») формується вигляд цієї розрахункової області.

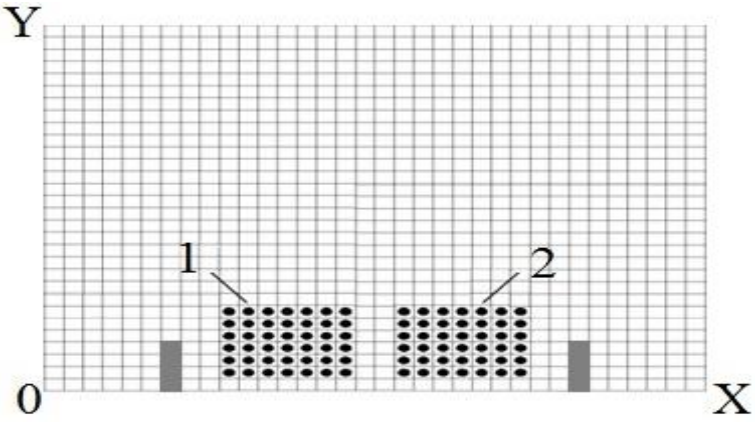


Рисунок 2.87 – Схема маркування розрахункової області:
1 – корпус локомотива; 2 – корпус локомотива (джерела шумового забруднення).

У ході обчислювального експерименту приймалось, що швидкість звуку дорівнює 340 м/с, висота шумозахисного бар'єра – 5 м (перший варіант) та 2 м (другий варіант).

Нижче на рисунках показано поле акустичного тиску для моменту часу t=0,005 с. Зауважимо, що там, де розташовані локомотиви, рівень шуму дорівнює 100 %.

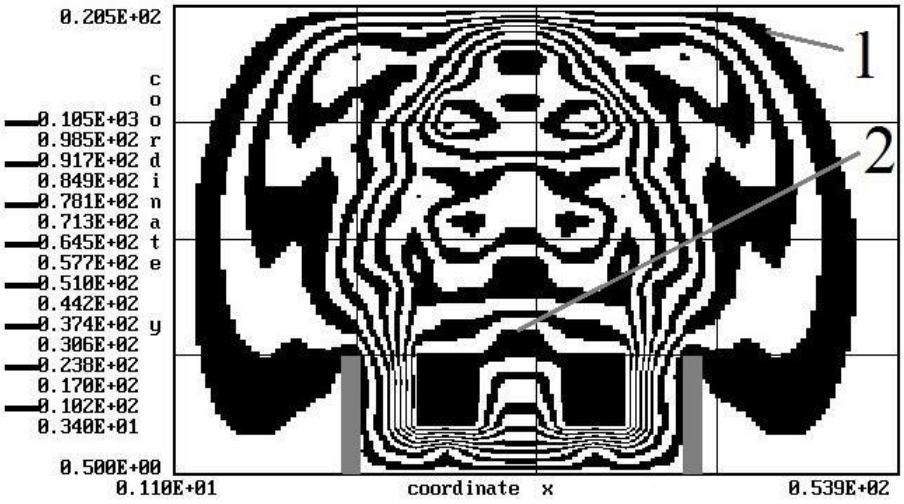


Рисунок 2.88 – Поле акустичного тиску (шумозахисний екран висотою 5 м): 1 – P=10 %; 2 – P=90 %.

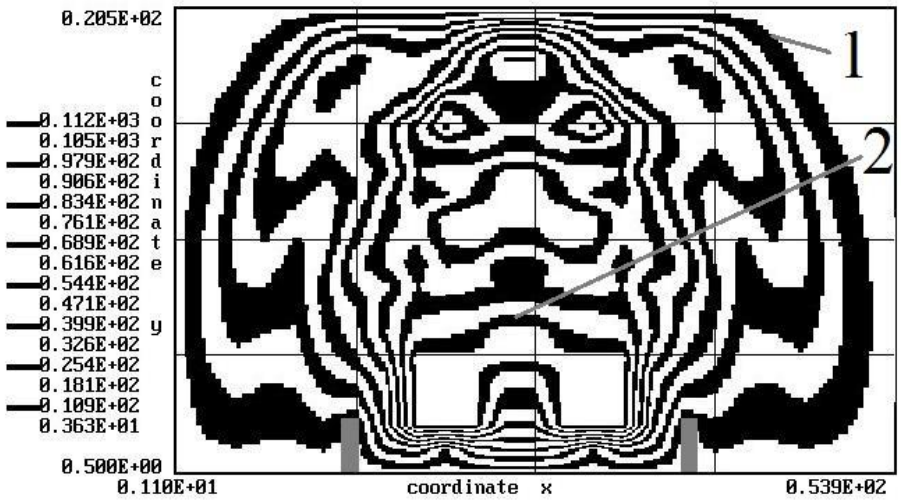


Рисунок 2.89 – Поле акустичного тиску (шумозахисний екран висотою 2 м): 1 – P=10 %; 2 – P=90 %.

Як можна бачити з наведених рисунків, внаслідок інтерференції звукових хвиль у розрахунковій області формується складна картина розподілу акустичного тиску. Також легко бачити, як позиція шумозахисних екранів впливає на деформацію поля акустичного тиску. За екранами формується область акустичної тіні, причому в разі використання екрана висотою 2 м ця зона значно менша, ніж для екрана висотою 5 м.

Зауважимо, що час розрахунку на базі розробленої чисельної моделі становить 3 с.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено CFD-модель для визначення ефективності використання бар'єрів, що мають складну геометричну форму та застосовуються для зниження рівня хімічного забруднення робочих зон біля автомагістралей. Особливістю розробленого методу є можливість здійснювати оцінку ефективності екранів, що мають складну геометричну форму.

2. Показано, що використання додаткових елементів типу «шафа» на захисних бар'єрах дозволяє знизити рівень хімічного забруднення в робочих зонах.

3. Розроблено метод розрахунку ефективності використання вентиляторів для зниження рівня хімічного забруднення в робочих зонах та встановлено закономірності щодо розподілу концентрації в робочий зоні в разі їх використання.

4. Розроблено метод розрахунку ефективності використання захисних бар'єрів з «ТХ Active» поверхнею. Встановлено закономірності щодо розподілу концентрації в робочий зоні за бар'єрами, що мають різне розташування «ТХ Active» поверхні.

5. На базі розробленої чисельної моделі виявлено закономірності розподілу концентрації хімічно небезпечної речовини в робочих зонах у разі використання «TX Active» поверхні на будинках.

6. Розроблено метод визначення ефективності застосування шумозахисних бар'єрів біля залізниці. Основою методу є чисельне інтегрування рівняння акустики для акустичного тиску (тобто побудована CFD-модель). Особливістю розробленого методу є можливість виконання досліджень в областях зі складним рельєфом та з урахуванням геометричної форми шумозахисних бар'єрів. Метод також дозволяє досліджувати формування полів акустичного тиску біля залізниці в разі прямування двох потягів.

7. Здійснено тестування розроблених моделей, що підтвердило їх адекватність.

8. Результати наведених результатів показують, що розроблені моделі та створені на їх базі комп'ютерні програми для виконання розрахунків з визначення ефективності використання захисних бар'єрів мають широкий робочий діапазон, що є важливим для виконання практичних розрахунків з метою оптимізації проєктних рішень.

РОЗДІЛ 3
ЗАХИСТ РОБОЧИХ ЗОН ВІД ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПІД ЧАС ВИНОСУ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ З НАПІВВАГОНІВ

Як відомо, транспортування вугілля до великих ТЕС здійснюється залізничним транспортом. Під час транспортування спостерігається значне забруднення робочих зон біля залізничної колії внаслідок виносу вугільного пилу з напіввагонів [55, 74, 151, 152]. У розділі розглядається розробка методів зменшення рівня пилового забруднення робочих зон під час виносу вугільного пилу з напіввагонів.

Основні положення цього розділу опубліковані автором у працях [27, 38, 122, 124, 125, 134].

3.1 Опис експериментальної установки

Під час транспортування вугілля залізничним транспортом у напіввагонах спостерігається суттєве забруднення повітря та підстильної поверхні біля транспортного коридору (рис. 3.1).

Пил, що потрапив на підстильну поверхню, з рухом вітру знову виноситься в повітря і таким чином відбувається повторне пилове забруднення робочих зон.

Таке забруднення відбувається, коли вантажний потяг з вугіллям чекає на розвантаження на території підприємства або безпосередньо під час транспортування вантажу територією. З наукового погляду вагон з вугіллям є джерелом пилового забруднення робочих зон, причому інтенсивність емісії пилу змінюється з часом зі зміною факторів, що на це впливають.

а

б

Рисунок 3.1 – Транспортування вугілля в на піввагонах:
а – завантаження напіввагонів
(https://cripo.com.ua/scandals/donbasskij-sled-kto-v-ukraine-pokupaet-belorusskij-ugol-kotorogo-ne-sushhestvuet/);
б – забруднення робочих зон біля транспортних магістралей
(https://biz.liga.net/all/tek/article/ugolnye-generaly-kto-nelegalno-vyvozit-antratsit-iz-donbassa).

Важливою задачею є розробка ефективних методів мінімізації рівня пилового забруднення робочих зон біля колії. Для зменшення рівня пилового забруднення робочих зон у роботі пропонується використання на вагонах з вугіллям спеціальних бортів. Дослідження ефективності використання цих

бортів виконувалося двома шляхами: експериментальним та методом математичного моделювання.

Модель напіввагона з вантажем заповнювалася вугіллям з Межиріченського ГЗК (вологість 4,6 %). Експериментальна установка розташовувалася на столі, потік повітря здійснювався за рахунок використання повітродувки (рис. 3.2).

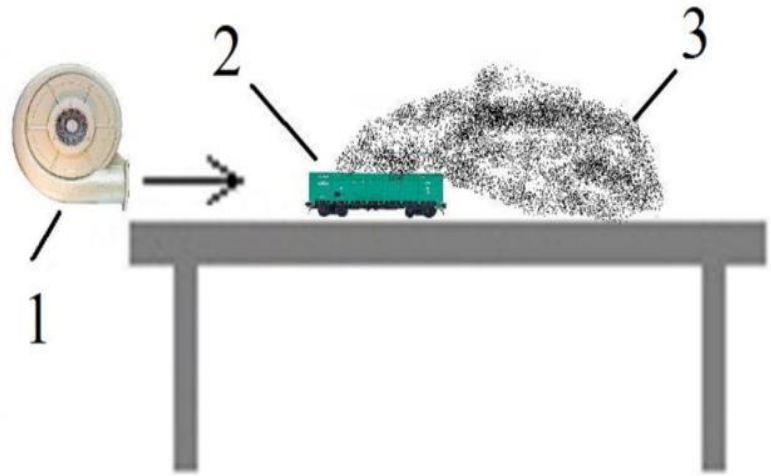


Рисунок 3.2 – Схема експериментальної установки:
1 – повітродувка; 2 – модель напіввагона з вантажем; 3 – зона забруднення.

Як базова платформа використовувалася модель вагона марки 12-1592. Під час експериментів вимірювалася концентрація пилу на відстані від моделі вагона з вантажем при різній швидкості повітря. Для вимірювання швидкості повітряного потоку використовувався анемометр GM 8908. Концентрація пилу (PM2.5) вимірювалася за допомогою вимірювача WP6910 на висоті $0.5h$ (h – довжина від головки рейки до половини висоти бортів). Замір проводився на відстані R від об’єкта (R – довжина вагона). Експериментальні дослідження були виконані при відносній вологості повітря в лабораторії 62 % та температурі повітря 22–24 °C.

3.2 Дослідження ефективності застосування додаткових бортів з двома «крилами» для захисту робочих зон від забруднення

Основна ідея роботи полягає у висуненні робочої гіпотези, що використання додаткових бортів на вагоні з вугіллям змінює аеродинаміку повітряного потоку біля вантажу, зменшує швидкість потоку та внаслідок цього зменшується пилоутворення з поверхні вантажу. Для підтвердження цієї робочої гіпотези була виконана серія експериментів, коли на вагоні встановлювалися борти особливої форми.

Розміри моделі: 12 800 мм × 3 474 мм × 3 134 мм, тобто модель вагона виконана в масштабі 1:100 (рис. 3.3).

Рисунок 3.3 – Модель вагона з вантажем (вугіллям)

Ця модель вагона використовувалася для дослідження виносу вугільного пилу з напіввагонів при використанні додаткових бортів (рис. 3.4). Ставилася задача визначити, як впливають борти з додатковими елементами на зниження виносу вугільного пилу з вагона, а значить, на ступінь забруднення робочих зон біля колії.

Експериментальні дослідження виконувалися, коли борти на вагоні мали два додаткових елементи: один – внутрішній елемент (за типом

«шафа»), другий – зовнішній (рис. 3.4) [122]. Висота розташування додаткових бортів дорівнювала 6 мм над бортами вагону. Внутрішній елемент мав довжину 6 мм. Зовнішній елемент мав довжину 7 мм та розташувався під кутом 45^0.

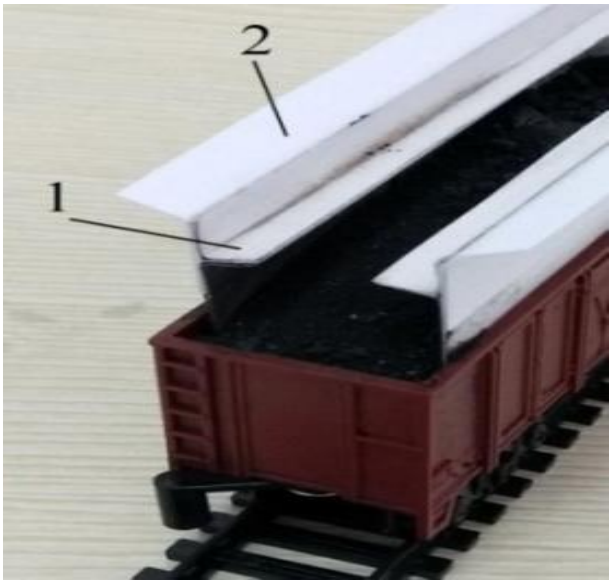


Рисунок 3.4 – Застосування бортів з додатковими елементами:
1 – внутрішній елемент; 2 – зовнішній елемент.

У ході експериментальних досліджень як критерій подібності використовувалося число Рейнольдса. Значення числа Рейнольдса розраховувалося таким чином:

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot L}{\nu}.$$

У розрахунку числа Рейнольдса як характерний лінійний розмір використовувалася довжина моделі вагона, $\nu = 15.06 \cdot 10^{-6} \text{м}^2/\text{с}$.

У табл. 3.1 показано значення концентрації вугільного пилу ($PM_{2.5}$) для різної швидкості повітряного потоку при різних значеннях його швидкості.

Таблиця 3.1 – Значення концентрації пилу, мкг/м^3

Швидкість потоку, м/с	Базовий варіант (немає додаткових елементів)	Борти з додатковими елементами
2,2–2,6	6,6–7,4	2,3–2,9
6,3–6,8	17,6–18.2	5,8–6,6
10,1–10,6	22,9–23,6	8,6–9,5

Як бачимо із цієї таблиці, використання додаткових елементів на бортах дозволяє зменшити рівень пилового забруднення на промисловому майданчику майже в 2,5 рази порівняно з відсутністю на вагоні спеціальних бортів.

Для практики дуже важливим є використання математичних моделей, що дозволяють визначити ефективність захисту робочих зон біля транспортного коридору від пилового забруднення. Тому на наступному етапі була розроблена така математична модель. Розглянемо її.

Для розрахунку аеродинаміки повітряного потоку при емісії вугільного пилу з вагона використовується таке рівняння [38, 109, 122]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \tag{3.1}$$

де P – потенціал швидкості.

Якщо ми маємо дані щодо поля потенціалу швидкості, компоненти вектора швидкості визначаються так [76]:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad \nu = \frac{\partial P}{\partial y}. \tag{3.2}$$

Граничні умови для моделюючого рівняння (рівняння для потенціалу швидкості) записуються у вигляді:

1) на боках вагона, нижній та верхній межах:

$$\partial P/\partial n = 0,$$

де n – одинична зовнішня нормаль до межі;

2) на межі, де повітряний потік входить: $\partial P/\partial n = V_n$ (V_n – відоме значення швидкості);

3) на межі виходу повітряного потоку $P = P_0 + const$ (P_0 – довільне число).

Процес поширення вугільного пилу в робочих зонах моделюється таким рівнянням [38, 109, 122]:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (\nu - w_s)C}{\partial y} = \\ &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \\ &+ \sum q_i \delta(x - x_i)\delta(y - y_i) \end{aligned} \qquad (3.3)$$

де C – масова концентрація пилу;

t – час;

u, v – компоненти вектора швидкості потоку повітря;

w_s – швидкість гравітаційного осідання часток пилу;

μ_x, μ_y – коефіцієнти дифузії;

q_i – інтенсивність виносу пилу від ділянки на поверхні вантажу;

x_i, y_i – координати на поверхні вантажу, де спостерігається винос часток пилу;

$\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)$ – дельта функція Дірака.

У побудованій математичній моделі поверхня вантажу, від якої відбувається винос вугільного пилу, моделюється набором точок за

допомогою дельта-функції Дірака. Інтенсивність виносу пилу від кожної ділянки на поверхні вантажу q, мг/(м^{2}с), розраховується на базі емпіричної моделі [121]:

$$q = 4,2 \cdot \left(V - V_{th}\right), \tag{3.4}$$

де V – швидкість повітряного потоку біля поверхні ділянки вантажу, м/с,

V_{th} – «порогове» значення швидкості, після якого починається відрив часток ($V_{th} = 1,58 м/с$).

Таким чином, у побудованій математичній моделі враховується різна інтенсивність виносу пилу від різних ділянок вантажу, оскільки біля кожної ділянки локальна швидкість повітряного потоку різна. Ця локальна швидкість визначається шляхом розв'язання задачі аеродинаміки (3.1), (3.2).

Граничні умови для моделюючого рівняння (3.3):

1. $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$ – на непроникних межах (n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні);

2. $C = 0$ – на межі, де потік входить до розрахункової області;

3. $\left.\frac{\partial C}{\partial n}\right|_{\Gamma_2} = 0$ – на межі виходу потоку.

Для моменту часу $t = 0$ початкова умова записується так: $C = 0$.

Розглянемо побудову чисельної моделі на базі розглянутих рівнянь аеродинаміки та масопереносу пилу.

По-перше, будемо використовувати прямокутну різницеву сітку, де маркерами будуть визначатися дві зони:

1. Геометрична форма вагона та бортів з додатковими елементами.

2. Геометрична форма поверхні вантажу, з якої відбувається винос вугільного пилу.

По-друге, значення концентрації вугільного пилу та потенціалу швидкості будемо визначати в центрах різницевих комірок.

Для розв’язання задачі аеродинаміки приведемо рівняння Лапласа для потенціалу швидкості до вигляду [109]

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \tag{3.5}$$

де t – фіктивний час.

Перед початком розв’язання рівняння (3.5) потрібно задати початкову умову, наприклад $P = 0$ для $t = 0$.

Далі використовуємо змінно-трикутний метод розв’язання рівняння (3.5). Це двокроковий метод чисельного розв’язання задачі. На першому кроці розв’язується таке рівняння [109]:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^{n}}{0.5\Delta t} = \frac{P_{i+1,j}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}.$$

На другому кроці розв’язується рівняння [109]:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{0.5\Delta t} = \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}.$$

Значення потенціалу швидкості на кожному кроці визначається за явною формулою. Розрахунок закінчується після виконання умови

$$\left|P_{ij}^{n+1} - P_{ij}^{n}\right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число.

У розрахунках приймалось $\varepsilon = 0,0005$; n – номер ітерації.

Далі розраховується швидкість повітряного потоку за формулами:

$$u_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{i,j-1}}{\Delta y}. \quad (3.6)$$

Наголосимо, що при цьому підході визначається швидкість повітряного потоку в усій області дослідження, зокрема біля поверхі вантажу у вагоні.

Розглянемо чисельну модель для визначення концентрації пилу в робочих зонах. Для розв'язання цієї задачі потрібно знайти розв'язок рівняння масопереносу. Здійснимо апроксимацію похідних у моделюючих рівняннях та побудуємо чисельну модель процесу поширення пилу з вагона з вугіллям. Перетворення мають вигляд [109]:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^{+}C}{\partial x} + \frac{\partial u^{-}C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^{+}C}{\partial y} + \frac{\partial v^{-}C}{\partial y},$$

$$u^{+} = (u + |u|)/2, u^{-} = (u - |u|)/2,$$

$$v^{+} = (v + |v|)/2, v^{-} = (v - |v|)/2$$

$$\frac{\partial u^{+}C}{\partial x} \approx \frac{u^{+}_{i+1,j}C^{n+1}_{ij} - u^{+}_{ij}C^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x} = L^{+}_{x}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^{-}C}{\partial x} \approx \frac{u^{-}_{i+1,j}C^{n+1}_{i+1,j} - u^{-}_{ij}C^{n+1}_{ij}}{\Delta x} = L^{-}_{x}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^{+}C}{\partial y} \approx \frac{v^{+}_{i,j+1}C^{n+1}_{ij} - v^{+}_{ij}C^{n+1}_{i,j-1}}{\Delta y} = L^{+}_{y}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^{-}C}{\partial y} \approx \frac{v^{-}_{i,j+1}C^{n+1}_{i,j+1} - v^{-}_{ij}C^{n+1}_{ij}}{\Delta y} = L^{-}_{y}C^{n+1}.$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C^{n+1}_{ij} - C^{n}_{ij}}{\Delta t}.$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) \approx \mu_x \frac{C^{n+1}_{i+1,j} - C^{n+1}_{ij}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C^{n+1}_{ij} - C^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x^2} =$$

$$= M^{-}_{xx}C^{n+1} + M^{+}_{xx}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) \approx \mu_y \frac{C^{n+1}_{i,j+1} - C^{n+1}_{ij}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{C^{n+1}_{ij} - C^{n+1}_{i,j-1}}{\Delta x^2} =$$

$$= M^{-}_{yy}C^{n+1} + M^{+}_{yy}C^{n+1}.$$

Тоді аналог рівняння масопереносу може бути записаний так:

$$\frac{C^{n+1}_{ij} - C^{n}_{ij}}{\Delta t} + L^{+}_{x}C^{n+1} + L^{-}_{x}C^{n+1} + L^{+}_{y}C^{n+1} + L^{-}_{y}C^{n+1} + \sigma C^{n+1}_{ij} =$$
$$= (M^{+}_{xx}C^{n+1} + M^{-}_{xx}C^{n+1} + M^{+}_{yy}C^{n+1} + M^{-}_{yy}C^{n+1}) + Q_{ij}\delta_{ij}. \qquad (3.7)$$

Параметр δ_{ij} дорівнює 1, якщо в різницевій комірці є джерело забруднення, та 0, якщо в комірці немає джерела забруднення.

Зауважимо, що використовується така залежність:

$$Q_{ij} = Q_k / \Delta x / \Delta y,$$

де Q_k – інтенсивність джерела викиду забруднювача.

Для розв'язання задачі з визначення концентрації пилу здійснюється розщеплення (2.23) таким чином [109]:

1) крок 1 (k=1/4):

$$\frac{C_{ij}^{n+k}-C_{ij}^{n}}{\Delta t}+\frac{1}{2}(L_x^{+}C^{k}+L_y^{+}C^{k})+\frac{\sigma}{4}C_{ij}^{k}= \\ =\frac{1}{4}(M_{xx}^{+}C^{k}+M_{xx}^{-}C^{k}+M_{yy}^{+}C^{n}+M_{yy}^{-}C^{n})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_l}{4}\delta_l; \tag{3.8}$$

2) крок 2 (k=n+1/2; c=n+1/4):

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}(L_x^{-}C^{k}+L_y^{-}C^{k})+\frac{\sigma}{4}C_{ij}^{k}= \\ =\frac{1}{4}(M_{xx}^{-}C^{k}+M_{xx}^{+}C^{c}+M_{yy}^{-}C^{k}+M_{yy}^{+}C^{c})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_l}{4}\delta_l; \tag{3.9}$$

3) крок 3 (k=n+3/4; c=n+1/2):

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}(L_x^{+}C^{k}+L_y^{-}C^{k})+\frac{\sigma}{4}C_{ij}^{k}= \\ =\frac{1}{4}(M_{xx}^{-}C^{c}+M_{xx}^{+}C^{k}+M_{yy}^{-}C^{k}+M_{yy}^{+}C^{c})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_l}{4}\delta_l; \tag{3.10}$$

4) крок 4 (k=n+1; c=n+3/4):

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}(L_x^{-}C^{k}+L_y^{+}C^{k})+\frac{\sigma}{4}C_{ij}^{k}= \\ =\frac{1}{4}(M_{xx}^{-}C^{k}+M_{xx}^{+}C^{c}+M_{yy}^{-}C^{c}+M_{yy}^{+}C^{k})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q}{4}\delta_l. \tag{3.11}$$

Концентрація пилу визначається на кожному кроці за явною формулою.

На базі розробленої чисельної моделі створено код CaWG, мова програмування – FORTRAN. До складу коду входять:

– CaW0.DAT – файл початкових даних;

– CaWK1 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку 2D-поля потенціалу швидкості в області дослідження;

– CaWK2 – підпрограма типу SUBROUTINE для визначення значення 2D-поля швидкості повітря в області дослідження;

– CaWK3 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні рівняння для потенціалу швидкості;

– CaWK – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку рівняння переносу пилу за рахунок конвекції;

– CWKA – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку рівняння переносу пилу за рахунок дифузії;

–CaWK4 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні рівняння конвективного переносу пилу;

– CWK5 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля концентрації пилу в області дослідження.

– CWT – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку за методом Ейлера зміни концентрації пилу під дією джерела викиду;

– CW0T – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку інтенсивності емісії пилу від поверхні вантажу.

Алгоритм розв’язання задачі такий:

1. У файл початкових даних вводиться інформація щодо форми бортів на вагоні, геометричної форми поверхні вантажу, швидкості руху потяга тощо.

2. Здійснюється чисельний розв’язок 2D-рівняння для потенціалу швидкості.

3. Визначається 2D-поле швидкості потоку повітря в області дослідження.

4. Розраховується інтенсивність виносу пилу від різних ділянок поверхні вантажу.

5. Розраховується зміна концентрації пилу внаслідок емісії.

6. Розраховується 2D-процес конвективного та дифузійного переносу забруднювачів у області дослідження.

7. Здійснюється друк поля концентрації пилу в робочий зоні.

Вихідні дані для моделювання:

1. Дані щодо геометричної форми бортів.

2. Форма поверхні вантажу у вагоні.

3. Форма та розмір додаткових елементів на бортах.

4. Швидкість повітряного потоку.

Нижче наведено результати розв’язання задачі з визначення ефективності використання бортів з додатковими елементами для зменшення рівня забруднення робочих зон біля колії.

Моделювання виконувалося за таких вихідних даних: розміри розрахункової області 25 м × 12 м; швидкість потягу 28 км/год; швидкість осадження часток пилу $5.1 \cdot 10^{-3}$ м/с, вагон марки 12-1592.

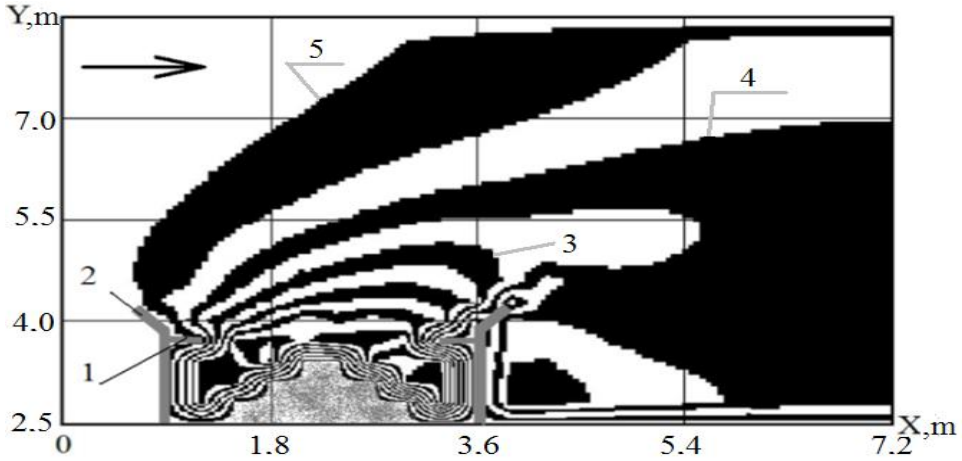


Рисунок 3.5 – Забруднення повітря біля вагона:
1 – внутрішній елемент; 2 – зовнішній елемент; 3 – C=0,36 мг/м^3,
4 – C=0,22 мг/м^3, 5 – C=0,04 мг/м^3.

Як бачимо з рис. 3.5, внутрішній елемент на борту відіграє роль малого «даху», що частково локалізує область пилоутворення на вантажі. Зовнішній елемент відіграє роль «закрилка», що змінює напрям повітряного потоку біля вагона.

У табл. 3.2 показано, як змінюється концентрація вугільного пилу в робочій зоні біля колії. Розв'язок задачі здійснено для швидкості потяга 35 км/год. Дані наведено для сценарію, коли немає додаткових бортів (сценарій 1) та з додатковими бортами (сценарій 2). Концентрація наведена на різній відстані від борта вагону на рівні 2,8 м.

Таблиця 3.2 – Концентрація пилу *C* в робочій зоні, мг/м^3

Відстань *x*, м	Сценарій 1	Сценарій 2
1	0,33	0,14
2	0,28	0,11
3	0,21	0,08

Таким чином, наведені дані підтверджують, що використання бортів запропонованої форми надає можливість зменшити рівень забруднення робочих зон біля колії.

Час розрахунку складав 5 с.

3.3 Дослідження ефективності застосування екрана з додатковим елементом для захисту робочих зон від забруднення

У ході досліджень була сформована робоча гіпотеза, що використання на вагоні з вугіллям екрана з додатковим елементом змінює аеродинаміку повітряного потоку біля вантажу, а значить, зменшує пилоутворення з поверхні вантажу. Для підтвердження цієї робочої гіпотези виконано серію експериментів, коли на вагоні встановлювався екран з додатковим елементом

особливої форми. Як базова платформа використовувалася модель вагона марки 12-1592. Опис експериментальної установки та опис експерименту розглядається в п. 3.2. Масштаб моделювання 1:100. Виміри здійснено при швидкості повітряного потоку 9,4 м/с – 10,2 м/с. Як критерій подібності використовувалося число Рейнольдса, як і в попередньому параграфі.

Розглядалося три сценарії [125]:

1. Сценарій 1: вагон без екрана (рис. 3.6).

2. Сценарій 2: вагон з екраном, що має додатковий елемент з ухилом «по потоку» (рис. 3.7).

3. Сценарій 3: вагон з екраном, що має додатковий елемент з ухилом «проти потоку» (рис. 3.8).

Висота моделі екрана 0,9 см, довжина нахиленої частини 0,7 см, ухил 45^0.

Рисунок 3.6 – Модель вагона (сценарій 1)

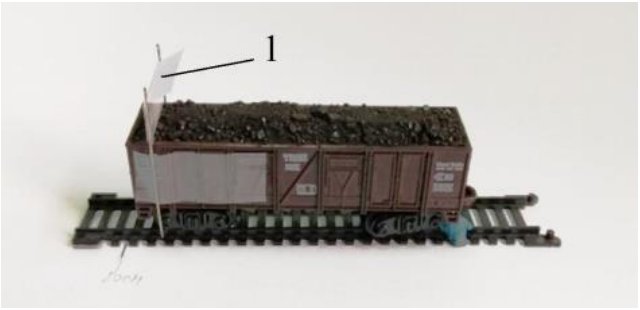


Рисунок 3.7 – Модель вагона з екраном (сценарій 2: додатковий елемент з ухилом «по потоку»)

Рисунок 3.8 – Модель вагона з екраном (сценарій 3): додатковий елемент з ухилом «проти потоку»

Нижче на рисунках показана зона забруднення підстильної поверхні для сценаріїв, що розглядаються.

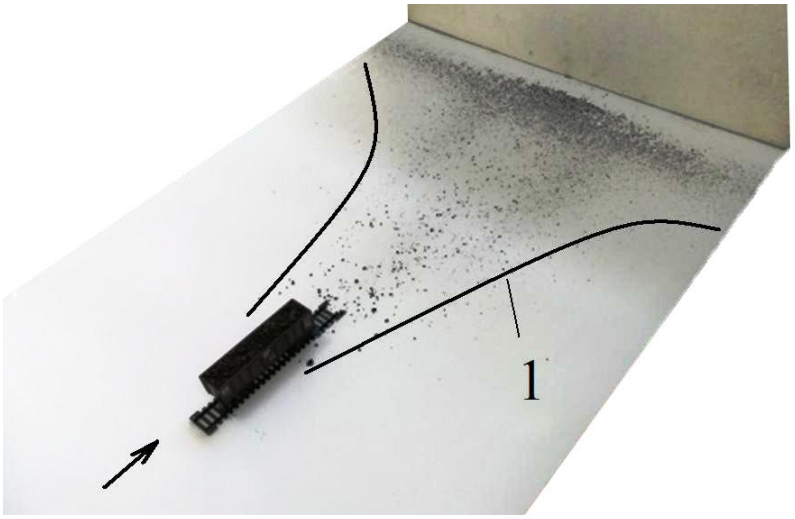


Рисунок 3.9 – Зона забруднення біля вагона (сценарій 1):
1 – межа зони забруднення.

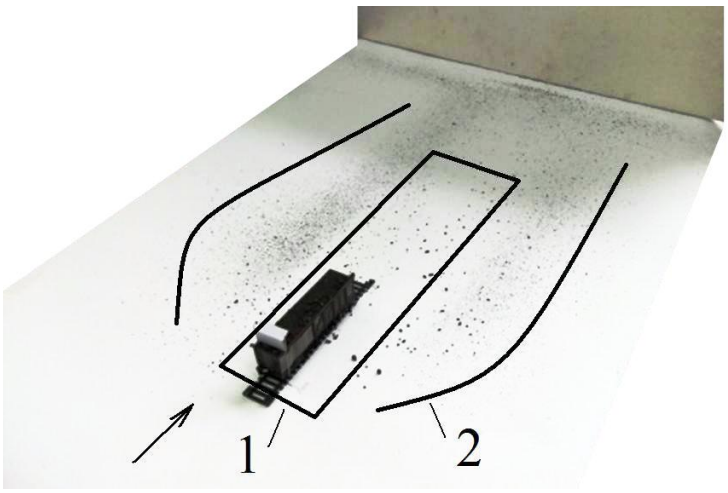


Рисунок 3.10 – Зона забруднення біля вагона (сценарій 2):
1 – межа внутрішньої зони забруднення; 2 – межа зовнішньої зони забруднення.

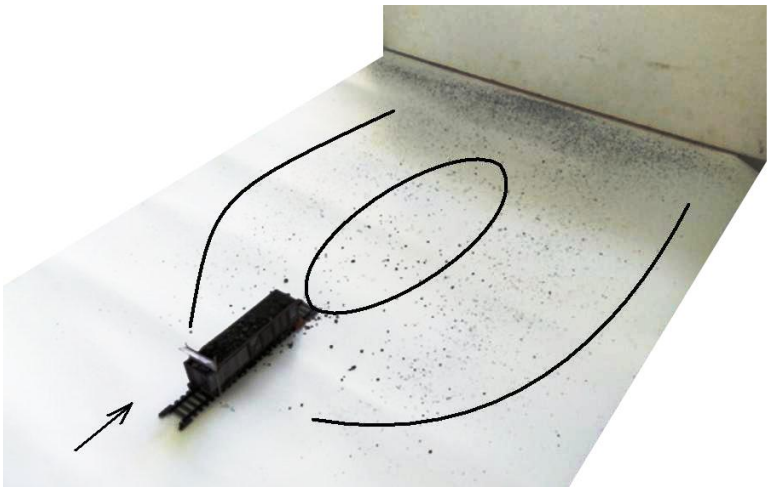


Рисунок 3.11 – Зона забруднення біля вагона (сценарій 3):
1 – межа внутрішньої зони забруднення; 2 – межа зовнішньої зони забруднення.

З аналізу рис. 3.9 – 3.11 бачимо, що область забруднення для кожного сценарію різна. Так, для сценарію 1 (немає екрана) область забруднення має чорний колір, що вказує на дуже інтенсивне забруднення робочих зон біля транспортного коридору. Зона забруднення має форму, близьку до конічної.

Для сценарію 2 область забруднення можна поділити на дві підобласті. Перша – «покриває» рейки та створює «коридор забруднення» біля них. Ця підобласть має незначний чорний колір, що вказує на мале забруднення робочих зон біля транспортного коридору. Друга підобласть «охоплює» першу підобласть забруднення, її колір значно менш насичений, ніж для сценарію 1.

Для сценарію 3 область забруднення також може буди поділена на дві підобласті, що мають форму, близьку до овала. Колір цих підобластей не такий чорний, як для сценарію 1 (немає екрана), що вказує на менш інтенсивне забруднення робочих зон біля транспортного коридору.

У табл. 3.3 наведено значення середньої концентрації вугільного пилу ($PM_{2.5}$), що вимірювалися на різній довжині від моделі вагона з вугіллям. Ці виміри були здійснені для довжини $L, 2L, 3L$, де L – довжина моделі вагона, та на висоті, що дорівнює висоті моделі вагона.

Таблиця 3.3 – Середня концентрація вугільного пилу, $\mu g \cdot m^{-3}$

Довжина	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
L	500	95	23
2L	128	54	17
3L	68	36	11

Аналіз даних з табл. 3.3 показує, що використання екрана з додатковим елементом дозволяє зменшити рівень забруднення повітря на промисловому майданчику, що розташований біля колії. Так, для сценарію 3 концентрація пилу зменшується майже в 6 разів порівняно з тим, коли на вагоні немає спеціального екрана. Це досягається за рахунок впливу спеціального екрана на аеродинаміку потоку, що призводить до зменшення швидкості вітру біля поверхні вугілля у вагоні.

Додатково вимірювалася маса вугілля, що осіла на підстильну поверхню біля моделі транспортного коридору для кожного сценарію. Цей пил збирався та визначалася його вага. Виміри здійснювалися 7 разів для кожного сценарію, час продувки – 3 хв. Результати вимірів показали, що якщо прийняти масу пилу, що виноситься для сценарію 1 (немає екрана), за 100 %, то для сценарію 2 маса пилу, що була емітована з моделі вагона, буде дорівнювати 89 %, а для сценарію 3 – 84 %.

На другому етапі досліджень була побудована чисельна модель для прогнозування рівня пилового забруднення робочих зон, що розташовані біля транспортного коридору. Модель створена для розв'язання цієї задачі, коли на вагоні розташовано екрани з додатковими елементами.

Базовими рівняннями цієї моделі є рівняння [38]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial(\nu-v_g)C}{\partial y}= \\ =\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\sum Q_i\delta(x-x_i)\delta(y-y_i). \tag{3.12}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial^2 x}+\frac{\partial^2 P}{\partial^2 y}=0; \\ u=\frac{\partial P}{\partial x},\ \nu=\frac{\partial P}{\partial y}, \tag{3.13}$$

де C – концентрація пилу;

t – час; μ_x, μ_y – коефіцієнти дифузії;

(x_i, y_i) – координати місця емісії пилу;

$\delta(x-x_i), \delta(y-y_i)$ – дельта-функція Дірака;

Q_i – інтенсивність емісії пилу;

v_g – швидкість гравітаційного осадження пилу;

u, v – компоненти вектора швидкості повітряного потоку в робочій зоні;

P – потенціал швидкості.

Крайові умови для моделюючих рівнянь розглянуті в п. 3.2.

Для побудови чисельної моделі процесу рівняння для потенціалу швидкості запишемо так [100]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 P}{\partial^2 y}, \tag{3.14}$$

де t – фіктивний час.

Двоетапна різницева схема розщеплення для рівняння (3.14) записується таким чином [133, 134]:

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} &= \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2}\right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2}\right], \\ \frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^{n}}{\Delta t} &= \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}\right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}\right]. \end{aligned} \tag{3.15}$$

На кожному етапі визначення величини потенціалу швидкості здійснюється за явною формулою.

Розрахунок поля потенціалу швидкості закінчується, коли виконується умова:

$$\left|P_{ij}^{n+1} - P_{ij}^{n}\right| \le \varepsilon, \tag{3.16}$$

де ε – мале число ($\varepsilon = 0.001$);

n – номер ітерації.

Значення складових вектора швидкості повітряного потоку в робочих зонах визначається так:

$$u_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Розв'язання задачі по визначенню швидкості повітря біля вагону з додатковими бортами також здійснювалося за допомогою іншої моделі аеродинаміки. Моделюючі рівняння (рівняння Ейлера) такі [76, 109]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -u\frac{\partial \omega}{\partial x} - v\frac{\partial \omega}{\partial y} = -\overline{V} \cdot (\overline{\nabla}\omega), \qquad (3.17)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega,$$

де ω – вихор;

$\overline{V}$ – вектор швидкості потоку,

ψ – функція току.

Значення компонент швидкості потоку розраховуються так [76, 109]:

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = u; \ \frac{\partial \psi}{\partial x} = -v.$$

Граничні умови для цих моделюючих рівнянь [109]:

- верхня межа: ψ=const;
- тверда поверхня: ψ=const;
- на межі входу: відоме значення швидкості потоку u, значення функції току ψ та вихору ω: $\psi\big|_{\text{вхід}} = \psi(y)$, $\omega\big|_{\text{вхід}} = 0$;

- на межі виходу потоку реалізуються «м'які» граничні умови [109].

Для моменту часу t=0 реалізується умова: $\omega\big|_{t=0}=0$.

При використанні даної моделі значення вихору в кутових точках розраховується на базі методики, що наведена в роботі [109].

Розглянемо метод чисельного інтегрування моделюючих рівнянь. Для чисельного розв'язку будемо використовувати прямокутну різницеву сітку. Перше рівняння із системи (3.17) запишемо в дивергентному вигляді

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}+\frac{\partial u\omega}{\partial x}+\frac{\partial v\omega}{\partial y}=0. \qquad (3.18)$$

Різницеві рівняння розщеплення для рівняння (3.18) [109]:

- перший крок:

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1/2}+\omega_{i,j}^{n}}{\Delta t}+\frac{u_{i+1,j}^{+}\omega_{i,j}^{n+1/2}-u_{i+1,j}^{+}\omega_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x}+\frac{\nu_{i,j+1}^{+}\omega_{i,j}-\nu_{i,j-1}^{+}\omega_{i,j-1}}{\Delta y}=0;$$

- другий крок:

$$\frac{\omega_{ij}^{n+1}-\omega_{ij}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t}+\frac{u_{i+1,j}^{-}\omega_{i+1,j}^{n+1}-u_{i,j}^{-}\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x}+\frac{\nu_{i,j+1}^{-}\omega_{i,j+1}^{n+1}-\nu_{i,j-1}^{-}\omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta y}=0.$$

Невідоме значення вихору на кожному кроці розщеплення визначається за формулою «рахунку, що біжить» таким чином:

- перший крок:

$$\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}=\omega_{i,j}^{n}-\Delta t\frac{u_{i+1,j}^{+}\omega_{i,j}^{n+1/2}-u_{i+1,j}^{+}\omega_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x}-\Delta t\frac{\nu_{i,j+1}^{+}\omega_{i,j}-\nu_{i,j-1}^{+}\omega_{i,j-1}}{\Delta y}.;$$

- другий крок:

$$\omega_{ij}^{n+1} = \omega_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - \triangle t \frac{u_{i+1,j}^{-} \omega_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^{-} \omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} - \triangle t \frac{\nu_{i,j+1}^{-} \omega_{i,j+1}^{n+1} - \nu_{i,j-1}^{-} \omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta y}.$$

Значення вихору в кутовій точці розраховується за методологію, що розглянута в [109].

Для розв'язку другого рівняння із системи (3.17) запишемо це рівняння так:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \omega, \tag{3.19}$$

де η – фіктивний час.

Для чисельного інтегрування рівняння (3.19) використовується явна різніцева схема [99]. Розрахункова залежність має вигляд [99]:

$$\psi_{i,j}^{n+1} = \psi_{i,j}^{n} + \triangle t \frac{\psi_{i+1,j}^{n} - 2\psi_{i,j}^{n} + \psi_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \triangle t \frac{\psi_{i,j+1}^{n} - 2\psi_{i,j}^{n} + \psi_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2} + \omega_{i,j}.$$

На заключному етапі розраховується значення компонент вектора швидкості повітряного потоку:

$$u_{i,j} = \frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{\Delta y};$$
$$v_{i,j} = -\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{\Delta x}.$$

Розрахунок поля швидкості повітряного потоку на базі розглянутих моделей аеродинаміки (модель потенціального руху та рівняння Ейлера)

показав, що різниця по визначенню швидкості повітря в різницевих комірках дорівнює 12% – 16 % при використанні цих моделей. Модель потенціального руху дає більше значення швидкості повітря аніж модель, що базується на рівняннях Ейлера. На результат також впливає розмір різницевої сітки. Час розрахунку при використанні рівнянь Ейлера збільшується.

Далі здійснюється розв'язок рівняння масопереносу. Розраховане поле швидкості є основою для розв'язання задачі масопереносу. Спочатку виконаємо наступне розщеплення [77]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial \nu C}{\partial y}=0. \tag{3.20}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right). \tag{3.21}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=Q_i\delta(x-x_i)\delta(y-y_i). \tag{3.22}$$

Для чисельного інтегрування рівняння (3.20) ми використовуємо такі залежності [109]:

$$\frac{\partial uC}{\partial x}=\frac{\partial u^+C}{\partial x}+\frac{\partial u^-C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y}=\frac{\partial v^+C}{\partial y}+\frac{\partial v^-C}{\partial y},$$

$$u^+=\frac{u+|u|}{2},\ u^-=\frac{u-|u|}{2},$$

$$v^+=\frac{v+|v|}{2},\ v^-=\frac{v-|v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^+C}{\partial x}\approx\frac{u^+_{i+1,j}C^{n+1}_{i,j}-u^+_{i,j}C^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x}=L^+_xC^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^-C}{\partial x}\approx\frac{u^-_{i+1,j}C^{n+1}_{i+1,j}-u^-_{i,j}C^{n+1}_{i,j}}{\Delta x}=L^-_xC^{n+1},$$

$$\frac{\partial \nu^{+} C}{\partial y} \approx \frac{\nu^{+}_{i,j+1} C^{n+1}{}_{i,j} - \nu^{+}_{i,j} C^{n+1}{}_{i,j-1}}{\Delta y} = L^{+}_{y} C^{n+1},$$

$$\frac{\partial \nu^{-} C}{\partial y} \approx \frac{\nu^{-}_{i,j+1} C^{n+1}{}_{i,j+1} - \nu^{-}_{i,j} C^{n+1}{}_{i,j}}{\Delta y} = L^{-}_{y} C^{n+1}.$$

Схема розщеплення для рівняння (3.20) записується так [109]:

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C^{k}_{i,j} - C^{n}_{i,j}}{\Delta t} + L^{+}{}_{x} C^{k} + L^{+}{}_{y} C^{k} = 0; \tag{3.23}$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C^{n+1}_{i,j} - C^{k}_{i,j}}{\Delta t} + L^{-}{}_{x} C^{n+1} + L^{-}{}_{y} C^{n+1} = 0. \tag{3.24}$$

Невідоме значення C в кожному рівнянні визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування рівняння (3.21) використовується двоетапна різницева схема розщеплення [100]:

$$\frac{C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j} - C^{n}_{i,j}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j} + C^{n+\frac{1}{2}}_{i-1,j}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j} + C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{C^{n+1}_{i,j} - C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C^{n+1}_{i+1,j} - C^{n+1}_{i,j}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{C^{n+1}_{i,j+1} - C^{n+1}_{i,j}}{\Delta y^2} \right].$$

Невідоме значення концентрації пилу визначається із цих залежностей за явною формулою.

Для чисельного інтегрування рівняння (3.22) використовується метод Ейлера [100]. Розрахункова залежність має вигляд:

$$C_{ij}^{n+1} = C_{ij}^{n} + \triangle t \sum Q_i \delta(x - x_i)\delta(y - y_i).$$

На базі розробленої чисельної моделі створено код EKWag, мова програмування – FORTRAN. До складу коду входять:

– Ek0.DAT – файл початкових даних;

– Ek1 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку 2D-поля потенціалу швидкості в області дослідження;

– Ek2 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку 2D-поля швидкості повітряного потоку в області дослідження;

– Ek3 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні рівняння для потенціалу швидкості;

– Ek4 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку рівняння переносу пилу за рахунок конвекції;

– Ek5 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку рівняння переносу пилу за рахунок дифузії;

–Ek6 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні рівняння конвективного переносу пилу;

– Ek7 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля концентрації пилу в області дослідження;

– Ek8 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку за методом Ейлера зміни концентрації пилу під дією джерела викиду;

– Ek9 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку інтенсивності емісії пилу від поверхні вантажу;

– Ek10 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку функції току та поля вихору.

– Ek11 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку поля швидкості повітряного потоку в області дослідження при використанні рівнянь Ейлера.

Алгоритм розв’язання задачі такий:

1. У файл початкових даних вводиться інформація щодо форми екрана на вагоні, геометричної форми поверхні вантажу, швидкості руху потяга та таке інше.

2. Здійснюється чисельний розв’язок 2D-рівняння для потенціалу швидкості.

3. Визначається 2D-поле швидкості повітряного потоку в області дослідження.

4. Розраховується інтенсивність виносу пилу від різних ділянок поверхні вантажу (використовується залежність (3.4)).

5. Розраховується зміна концентрації пилу внаслідок емісії.

6. Розраховується 2D-процес конвективного та дифузійного переносу забруднювачів у області дослідження.

7. Здійснюється друк поля концентрації пилу в робочій зоні.

Вихідні дані для моделювання:

1. Дані щодо геометричної форми екрана.

2. Форма поверхні вантажу у вагоні.

3. Форма додаткових елементів на бортах.

4. Швидкість повітряного потоку.

Нижче наведено результати розв’язання задачі з визначення ефективності використання екрана з додатковим елементом для зменшення рівня забруднення робочих зон поблизу колії (використовувалася модель потенціального руху). Розміри розрахункової області 23 м × 13 м, швидкість повітряного потоку 40 км/год; швидкість осадження часток пилу $5{,}1\times10^{-3}$ м/с. На рис. 3.12, 3.13 показано зону пилового забруднення біля вагона з екраном. Кожне число на цих рисунках показує значення концентрації пилу в процентах від максимального значення концентрації C_{max}. Значення

концентрації надруковано за форматом «Integer». Тобто, якщо концентрація дорівнює 15,34 %, то друкується число 15 %, тобто без дробової частини.

Відзначимо, що в дужках наведено значення параметра C_{max} при розв'язку задачі аеродинаміки на базі рівнянь Ейлера.

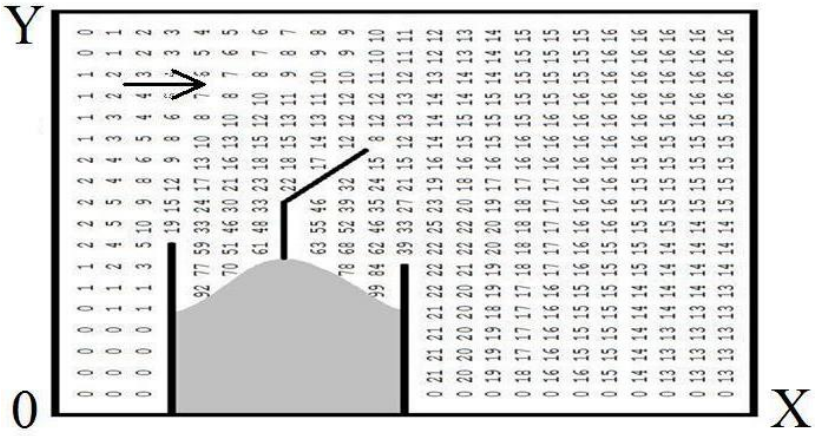


Рисунок 3.12 – Зона забруднення біля вагона (вагон з екраном, що має додатковий елемент з ухилом «по потоку», C_{max}=32,82 мг/м^3) (C_{max}=27,11 мг/м^3)

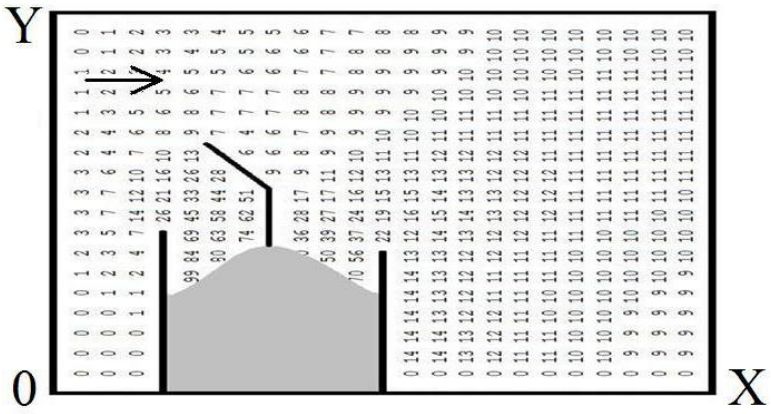


Рисунок 3.13 – Зона забруднення біля вагона (вагон з екраном, що має додатковий елемент з ухилом «проти потоку», C_{max}=35,5 мг/м^3) (C_{max}=31,33 мг/м^3)

Як бачимо з рис. 3.12, 3.13, у разі використання вагона з екраном, що має додатковий елемент з ухилом «по потоку», концентрація в робочій зоні біля колії змінюється від 21 % до 13 % від максимальної концентрації біля поверхні вантажу. У випадку вагона з екраном, що має додатковий елемент з ухилом «проти потоку», концентрація в робочій зоні біля колії змінюється від 14 % до 9 % від максимальної концентрації, тобто концентрації біля поверхні вантажу. Нижче на графіку показано, як змінюється концентрація пилу в робочій зоні біля колії в разі використання на вагоні екрана з додатковим елементом (розрахунок на базі моделі потенціального руху).

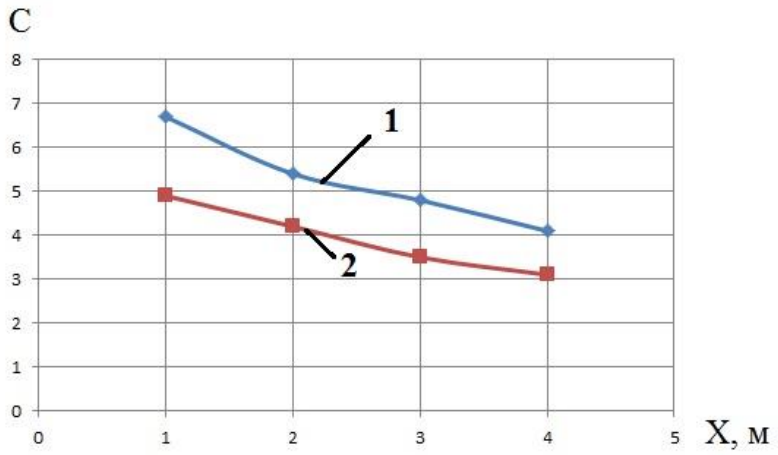


Рисунок 3.14 – Концентрація пилу в робочій зоні:
1 – сценарій 1; 2 – сценарій 2.

Якщо прийняти, що ГДК для пилу дорівнює 10мг/м^3, то, як ми бачимо з рис. 3.14, на відстані 3 м від колії концентрація пилу для сценарію 1 буде вдвічі меншою від ГДК, а при сценарії 2 – втричі меншою, ніж ГДК. Таким чином, використання екрана з додатковим елементом дозволяє зменшити рівень забруднення робочих зон біля колії.

Відзначимо, що час розрахунку складав 5 с (модель потенціального руху) та 15 с, якщо розв’язок задачі аеродинаміки був отриман на базі рівняння Ейлера.

Висновки до розділу 3

1. На основі виконаних експериментів підтверджена робоча гіпотеза про можливість зменшення забруднення повітря в робочих зонах біля залізничної колії шляхом використання на вагонах бортів з додатковими елементами.

2. Для оцінювання рівня забруднення робочих зон при виносі пилу з вагонів зі спеціальними бортами (борти з додатковими елементами) створена комп'ютерна модель, що дозволяє розв'язувати задачу з урахуванням швидкості руху вагона, геометричної форми бортів, дифузії, нерівномірної швидкості емісії пилу від різних ділянок вантажу у вагоні.

3. На основі виконаних експериментів підтверджена робоча гіпотеза про можливість зменшення забруднення повітря в робочих зонах біля залізничної колії шляхом використання на вагонах екранів з додатковими елементами.

4. Для оцінювання рівня забруднення робочих зон під час виносу пилу з вагонів з екраном (екран з додатковим елементом) створена комп'ютерна модель, що дозволяє розв'язувати задачу з урахуванням швидкості руху вагона, геометричної форми екрана, дифузії, нерівномірної швидкості емісії пилу від різних ділянок вантажу у вагоні.

5. Створені комп'ютерні моделі дають можливість виконувати дослідження із визначення забруднення повітря в робочих зонах біля залізничної колії в режимі реального часу. Ці комп'ютерні моделі є ефективним інструментом параметричного аналізу рівня забруднення робочих зон біля залізничної колії.

РОЗДІЛ 4
ОЦІНЮВАННЯ ШКІДЛИВИХ ФАКТОРІВ ТА ЗАХИСТ РОБОЧИХ ЗОН ВІД ЗАБРУДНЕННЯ НА ТЕРИТОРІЇ ТЕС

На території ТЕС спостерігається дуже інтенсивне пилове та хімічне забруднення різних робочих зон на промисловому майданчику. Особливо небезпечним є таке забруднення на промисловому майданчику за несприятливих метеоумов (штиль, інверсія). Інтенсивність, розміри областей забруднення для таких умов залежать від багатьох чинників, зокрема швидкості й напрямку вітру, висоти шару інверсії та інших. Слід також зауважити, що дуже інтенсивним джерелом пилового забруднення промислових майданчиків є штабелі вугілля на території ТЕС (рис. 4.1). Тому важливим завданням є розробка ефективних методів мінімізації рівня пилового забруднення робочих зон на території ТЕС, які й розглянуто в цьому розділі. Також у розділі проаналізовано нові математичні моделі, що розроблені для оцінювання областей забруднення на промисловому майданчику ТЕС у випадку організованих або аварійних викидів за несприятливих метеоумов, а також описано математичні моделі, що дозволяють визначити ефективність використання різних методів зниження пилового забруднення біля вугільного штабеля. Наведено результати виконаних експериментальних досліджень.

Основні положення цього розділу опубліковані автором у працях [10, 12, 13, 17–25, 27, 29–31, 34–36, 38, 40–43, 46–48, 123, 130, 132–134].

4.1 Оцінювання рівня забруднення повітря на промисловому майданчику ТЕС за несприятливих метеоумов

Оцінювання рівня забруднення повітря на промислових майданчиках зазвичай здійснюється для умов конвекції. Але відомо, що при штилі або

інверсії концентрації домішки в повітрі будуть найбільшими. При штилі рух повітряних мас дуже незначний, що не дає можливості шлейфу забруднюючих речовин інтенсивно розсіюватися в повітрі. Це призводить до формування областей забруднення з дуже значною концентрацією домішки.

Слід зауважити, що якщо ТЕС розташована поблизу великої водойми (рис. 4.1а), то холодне повітря від поверхні водойми рухається в напрямку території ТЕС та створює шар холодного повітря над землею, а вище цього шару розташовується шар нагрітого повітря, тобто спостерігається локальна інверсія. При інверсії в приземному шарі атмосфери формуються шари з різною інтенсивністю розсіювання домішки (рис. 4.1б).

а)

б)

Рисунок 4.1 – Придніпровська ТЕС:

а) територія, де розташовано штабелі вугілля (Google Image, 2022);

б) різноманітний характер розсіювання викидів у різних шарах атмосферного повітря (фото: https://cutt.ly/eJMj7Ag).

Це також призводить до формування областей забруднення з дуже значною концентрацією домішки на території підприємства.

Тому на практиці дуже важливо мати методи оцінювання рівня забруднення повітря на промислових майданчиках за несприятливих метеоумов. Нижче розглядається побудова чисельного методу розв'зання такої задачі.

Для моделювання процесу поширення домішки при викидах з джерел, що розташовані на території ТЕС, в умовах інверсії або штилю застосовується таке рівняння масопереносу вагомої та газової домішки [77, 109]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}+\frac{\partial (w-w_s)C}{\partial z}=$$

$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial C}{\partial z}\right)+$$

$$+\sum Q_i\delta\left(x-x_i\right)\delta\left(y-y_i\right)\delta\left(z-z_i\right).$$

де C – концентрація домішки;

t – час;

w_s – швидкість гравітаційного осадження часток домішки;

μ_x,μ_y,μ_z – коефіцієнти турбулентної дифузії (конкретне значення цих коефіцієнтів відповідає умовам штилю або інверсії [49, 50]);

u, v, w – компоненти вектора швидкості повітря;

Q_i – інтенсивність викиду домішки від джерела забруднення;

$\delta(x-x_i),\delta(y-y_i),\delta(z-z_i)$ – дельта-функція Дірака;

x_i,y_i,z_i – декартові координати джерела викиду.

Крайові умови для даного моделюючого рівняння розглянуті в розділі 2.

Для моделювання поширення домішки в повітрі промислового майданчика для умов штилю використовуються такі залежності [49]:

$$\mu_z = \mu_1 \varphi_1(z),$$
$$u_z = u_1 \varphi_2(z),$$
$$\mu_y = ku,$$
$$\mu_x = ku,$$

де φ_1, φ_2 – спеціальні функції [49];

u_1 – швидкість вітру на висоті 10 м;

μ_1 – значення коефіцієнта дифузії на висоті 1м; $k = 0{,}1$.

Під час моделювання поширення домішки в повітрі для умов інверсії використовується така залежність для визначення зміни величини вертикального коефіцієнта дифузії з висотою z [49]:

$$\mu_z = \mu_1 \cdot (1 - \frac{z - z_i}{L_i})^2,$$

де z_i – нижня межа інверсії,

L_i – спеціальна функція, що враховує енергію турбулентності [49].

Таким чином, для моделювання концентраційних полів домішки на промисловому майданчику в умовах інверсії або штилю потрібно знайти розв’язок тривимірного рівняння масопереносу при відповідних залежностях для профілю швидкості та вертикального коефіцієнта дифузії. Розв’язок цієї задачі можливо отримати лише чисельним шляхом.

Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу здійснювалося його розщеплення на послідовність рівнянь, що описують лише один процес поширення домішки в робочих зонах [77]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial \nu C}{\partial y}+\frac{\partial wC}{\partial z}=0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial C}{\partial z}\right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\sum Q_i\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i).$$

Тут принято, що $w=w-w_s$.

Далі для чисельного інтегрування першого рівняння цієї системи використовувалася така різницева схема розщеплення [109]:

– на першому кроці ($k=\frac{1}{2}$) різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C^k_{i,j,k}-C^n_{i,j,k}}{\Delta t}+L^+{}_xC^k+L^+{}_yC^k+L^+{}_zC^k=0;$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C^{n+1}_{i,j,k}-C^k_{i,j,k}}{\Delta t}+L^-{}_xC^{n+1}+L^-{}_yC^{n+1}+L^-{}_zC^{n+1}=0.$$

Значення різницевих операторів L^+_x, L^-_x, L^+_y наведені в розд. 2.

Невідоме значення концентрації домішки в кожному рівнянні визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування другого рівняння системи використовується двоетапна різницева схема розщеплення [100]:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j,k}^{n}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] + \left[\mu_z \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right],$$

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} \right] + \left[\mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} \right].$$

Невідоме значення концентрації домішки визначається із цих залежностей за явною формулою.

Для чисельного інтегрування останнього рівняння системи використовується метод Ейлера [100]. Розрахункова залежність має вигляд

$$C_{ijk}^{n+1} = C_{ijk}^{n} + \Delta t \sum Q_i \delta(x - x_i)\delta(y - y_i)\delta(z - z_i).$$

Таким чином, для розрахунку концентраційних полів домішки послідовно розв’язуються наведені різницеві рівняння.

На базі розробленої чисельної моделі створено код CALM-3, мова програмування – FORTRAN. До складу коду входять:

– Ca.DAT – файл початкових даних;

– CA2 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку 3D концентраційного поля домішки в області дослідження при русі повітряних мас;

– CA4 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку 3D концентраційного поля домішки внаслідок дії процесу дифузії;

– CA5 – підпрограма типу SUBROUTINE для визначення зміни значення концентрації домішки при дії джерела забруднення;

– CE6 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку вертикального коефіцієнта дифузії при інверсії;

–CE62 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку вертикального коефіцієнта дифузії та профіля швидкості повітря при штилі;

– CA7 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля концентрації домішки в області дослідження.

Вихідні дані для моделювання:

1. Дані щодо форми, розмірів розрахункової області, положення джерел забруднення (координати).

2. Інтенсивність джерел забруднення.

3. Параметри метеоситуації (інверсія, штиль).

3. Час дії джерела забруднення.

4. Швидкість повітряного потоку.

Нижче наведено результати розв'язання двох задач на базі розробленої чисельної моделі. Перший сценарій – визначення рівня забруднення повітря на промисловому майданчику Придніпровської ТЕС при штилі. Другий сценарій – викид від двох труб на території ТЕС при штилі. Дані для моделювання: швидкість вітру $V_1 = 0{,}1$ м/с, напрям вітру – південно-східний; $\varphi_1(z) = z$, $\varphi_2(z) = z^n$, $n = 0{,}1$, $k = 0{,}1$ [49]; $\mu_X = \mu_Y = \mu_Z = 5$ м^2/с; розміри розрахункової області 850 м × 550 м × 200 м; висота викиду 120 м; Q=0,8 кг/с (з однієї труби). Нижче на рисунках наведено область забруднення (поле концентрації SO_2, рівень z=1,7 м) для кожного сценарію.

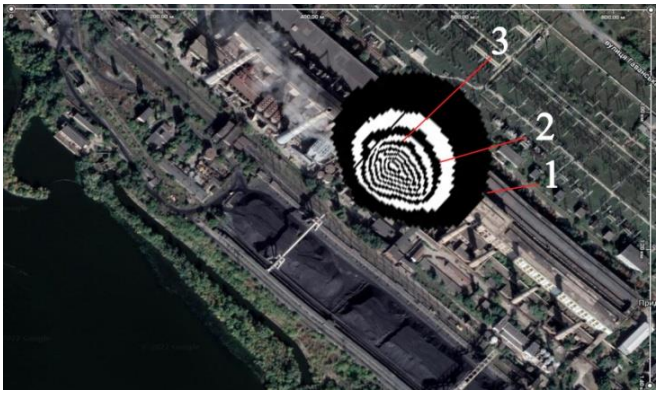


Рисунок 4.2 – Область забруднення при штилі, сценарій 1(Google Image, 2022):

1 – С=54 мг/м^3; 2 – С=81мг/м^3; 3 – С=86мг/м^3.

Як можна бачити з рис. 4.3, при штилі область забруднення близька до форми кола та покриває значну частину промислового майданчика. Значення концентрації SO_2 значно перевищує ГДК (10 мг/м^3). Часткова деформація форми області забруднення відбувається за рахунок невеликої швидкості повітря.

На рис. 4.3 наведено зону забруднення при штилі для другого сценарію.

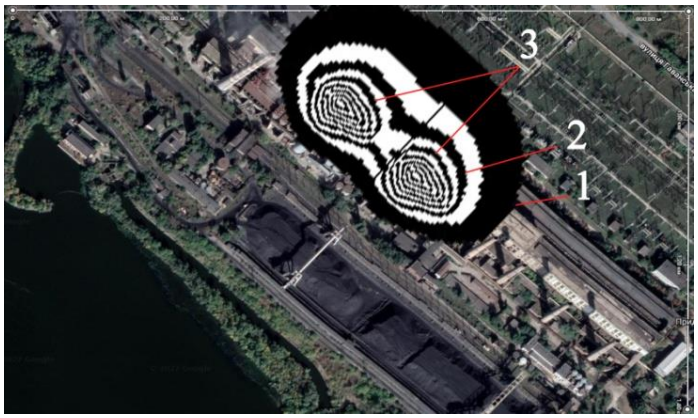


Рисунок 4.3 – Область забруднення при штилі, сценарій 2 (Google Image, 2022):
1 – C=68 мг/м^3; 2 – C=161 мг/м^3; 3 – C=170 мг/м^3.

Якщо порівняти цю область з областю забруднення на рис. 4.2 (викид з однієї труби), то можна побачити, що для другого сценарію форма області забруднення відрізняється від кола внаслідок взаємного впливу двох викидів. Це призводить до формування області забруднення за типом гантелі. Чітко можна бачити два локальних максимуми, що відповідають розташуванню джерел забруднення на промисловому майданчику. У табл.4.1 показано зміну концентрації домішки на висоті 1.7 м на різній відстані від джерела викиду (перший сценарій) та вздовж центральної лінії, що розташована між двома джерелами викиду.

Таблиця 4.1 – Зміна концентрації домішки на промисловому майданчику при штилі

Відстань *x*, м	Концентрація SO_2, мг/м^3/Перевищення ГДК (сценарій 1)	Концентрація SO_2, мг/м^3/Перевищення ГДК (сценарій 2)
4	88,4 /8,8	177,1 /17
10	88,2 /8,8	176,3 /17
16	87,7 / 8,7	174,7 /17

Як можна бачити з табл. 4.1, при роботі двох труб на території Придніпровської ТЕС в умовах штилю концентрація домішки на промисловому майданчику майже в 17 разів перевищує ГДК, що, безумовно, створює небезпеку для працівників.

Далі наведено результати розв’язання задачі з визначення рівня пилового забруднення повітря на промисловому майданчику Придніпровської ТЕС при інверсії. Емісія пилу відбувається з бокової та верхньої поверхні штабеля (рис. 4.4).

Рисунок 4.4 – Розрахункова область (Google Image, 2022):
1 – штабель вугілля (сховище вугілля) на території ТЕС.

Дані для прогнозування: висота штабеля 15 м; довжина штабеля 350 м; приймається штабель трапецеїдальної форми, ширина по верху 10 м, ширина по низу 30 м; швидкість вітру 3 м/с; $z_i = 1{,}5$ м, $L_i = 100$ м [49]; $\mu_1 = 0{,}05$ м/с; $\mu_x = 1{,}5$ м^2/с; $\mu_y = 1{,}5$ м^2/с; розміри розрахункової області 1800 м × 1000 м × 250 м. Інтенсивність емісії дрібнодисперсного пилу від поверхні штабеля розраховується на базі залежності (3.4); приймається, що параметр $w_s = 0{,}0001$ м/с. Зона пилового забруднення промислового майданчика показана на рівні 1,8 м (рис. 4.5).

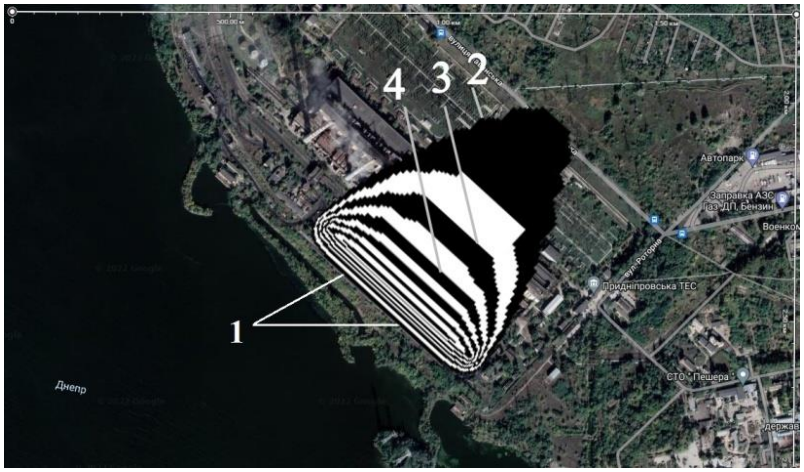


Рисунок 4.5 – Область пилового забруднення на промисловому майданчику при інверсії (Google Image, 2022):
1 – область розташування штабеля; 2 – С=9,01 мг/м^3; 3 – C=20,6 мг/м^3; 4 – C=30,9 мг/м^3.

Як можна бачити з рис. 4.5, область забруднення покриває значну частину промислового майданчика. Форма області забруднення має вигляд хвиль, що відходять від джерела забруднення – штабеля, тобто ця область схожа на область забруднення, що формується від лінійного джерела забруднення. Область забруднення зі значним градієнтом концентрації пилу відповідає положенню штабеля вугілля. Значення концентрації пилу на промисловому майданчику перевищує ГДК (6 мг/м^3). Це пов’язано з тим, що інверсійний шар не дає можливості добре розсіюватися домішці в повітрі.

Зміну концентрації пилу на висоті 1,8 м та вздовж лінії, що відповідає середині джерела забруднення та спрямована за напрямом вітру, показано в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Зміна концентрації пилу на промисловому майданчику при інверсії

Відстань *x*, м	Концентрація пилу, мг/м^3/Перевищення ГДК
40	71,4 /11,9
50	65,1 /10,8
60	59,2 / 9,8

Як можна бачити з табл. 4.2, при інверсії спостерігається суттєве забруднення промислового майданчика та концентрація пилу значно перевищує ГДК – майже в 10–12 разів.

Далі наведено результати розв’язання задачі з визначення рівня забруднення повітря на промисловому майданчику Придніпровської ТЕС при інверсії та у випадку аварійного розливу сірчаної кислоти. Відомо, що ця кислота потрапляє в залізничних цистернах до Придніпровської ТЕС та використовується для регенерації фільтрів у системі водокористування. Розглядається розлив кислоти біля залізничної колії (рис. 4.6).

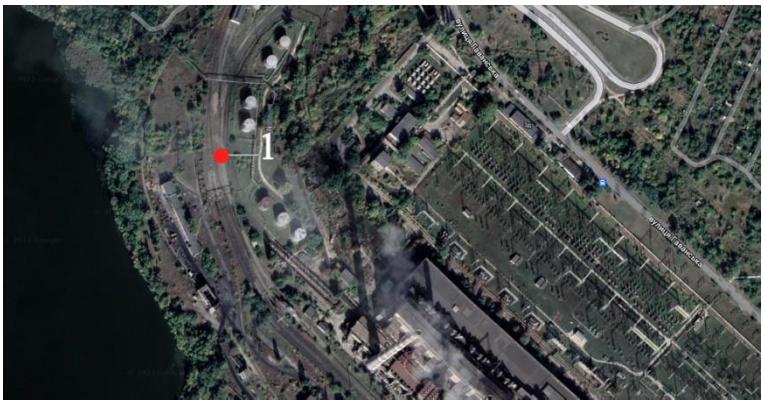


Рисунок 4.6 – Розрахункова область (Google Image, 2022):
1 – зона аварійного розливу.

Дані для прогнозування: розміри розрахункової області 1000 м × 550 м × 270 м; швидкість вітру 1,6 м/с; $z_i = 1{,}3$ м, $L_i = 100м$ [49]; $\mu_1 = 0{,}03$ м/с, $\mu_x = 1{,}1$ м^2/с, $\mu_y = 1{,}1$ м^2/с; площа зони аварійного розливу приймається 700 м^2. Інтенсивність емісії кислоти від зони розливу розраховується на базі залежності [78]:

$$Q_w = \left(5{,}83 + 4{,}1V\right) P_{\text{Н}} \sqrt{M},$$

де Q_w – кількість кислоти, що випаровується, грам/м^2/год;

V – локальна швидкість повітря біля вільної поверхні зони розливу;

P_H – тиск насиченої пари;

М – молекулярна маса кислоти.

Приймається, що параметр $w_s = 0{,}001$ м/с.

Область хімічного забруднення промислового майданчика показана на рис. 4.7 (рівень 1,6 м).

Рисунок 4.7 – Область хімічного забруднення на промисловому майданчику при інверсії, аварійний розлив (Google Image, 2022):

1 – C=0.05 мг/м^3; 2 – C=0.13 мг/м^3; 3 – C=0.26 мг/м^3.

Як можна бачити з рис. 4.7, область забруднення покриває значну частину промислового майданчика біля залізничної колії. Форма області забруднення має вигляд еліпса, що витягується в напряму вітру.

Зміну концентрації домішки на висоті 1,6 м на різній відстані від області аварійного розливу наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Концентрація сірчаної кислоти в повітрі при інверсії

Відстань x, м	Концентрація домішки, мг/м^3/Перевищення ГДК
2	2,7 /2,7
3	1,9 /1,9
4	1,6 / 1,6

Як можна з бачити табл. 4.3, спостерігається небезпечне забруднення промислового майданчика біля зони розливу та концентрація домішки перевищує ГДК (1 мг/м^3).

У кінці цього підрозділу наведено результати тестування побудованої чисельної моделі, що розроблена для прогнозування концентраційних полів домішки на промисловому майданчику в умовах штилю та інверсії. Це тестування здійснено шляхом порівняння результату прогнозу рівня забруднення повітря на базі створеної чисельної моделі з розрахунком на базі відомого аналітичного розв'язку тривимірного рівняння масопереносу (постійний викид від точкового джерела емісії). Аналітичний розв'язок записується таким чином [5]:

$$C = \frac{M}{4\pi x\sqrt{k_y k_z}} e^{-\frac{Wy^2}{4k_y x}} \cdot \left(e^{-\frac{W(z+H)^2}{4k_z x}} + e^{-\frac{W(z-H)^2}{4k_z x}} \right).$$

Дані для тестування [5]: $M=10^6$ мг/с – інтенсивність джерела забруднення; $k_z=5$ м^2/с – вертикальний коефіцієнт дифузії; $W=4$ м/с – швидкість вітру; $k_y=500$ м^2/с – горизонтальний коефіцієнт дифузії; $y=0$; $H=120$ м – висота джерела емісії домішки; $z=120$ м – рівень для визначення концентрації домішки.

У табл. 4.4 наведено дані тестування.

Таблиця 4.4 – Концентрація домішки на різній відстані від джерела емісії

x, км	C, мг/м^3 (аналітичний розв'язок [5])	C, мг/м^3 (розрахунок на базі побудованої моделі)
1	1,59	1,74
2	0,79	0,83
3	0,54	0,59
4	0,42	0,50

Дані з табл. 4.4 підтверджують адекватність побудованої чисельної моделі.

4.2 Оцінювання рівня пилового забруднення повітря в салоні авто, що рухається територією ТЕС

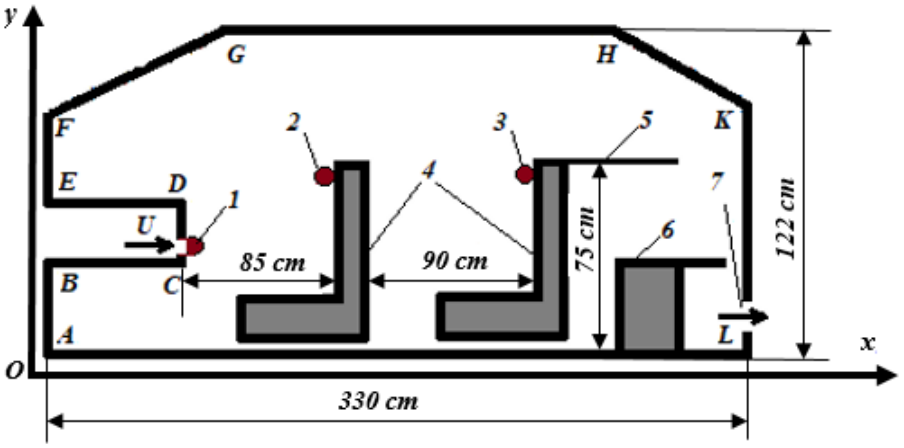
Територія ТЕС займає дуже значну площу. Нею рухаються як вантажні, так і легкові авто. Зрозуміло, що пил з атмосферним повітрям потрапляє всередину авто та спостерігається пилове забруднення салону (робочої зони), що негативним чином впливає на здоров'я працівників. Тому виникає проблема розробки інструментарію для оцінювання рівня пилового

забруднення салону авто з метою визначення величини цього шкідливого фактора для працівників.

Рисунок 4.8 – Авто біля ТЕС
(https://www.slovoidilo.ua/2022/02/21/novyna/suspilstvo/cherez-obstrily-zupyneno-robotu-luhanskoyi-tes)

Для прогнозування рівня пилового забруднення повітря в салоні авто розроблена чисельна модель, що дозволяє під час моделювання цього процесу врахувати: положення отворів вентиляції, режим повітряного обміну, режим емісії аеронів, наявність різного роду перешкод і можливе пилове забруднення повітряного середовища.

Розглядається салон авто LADA Xray у вигляді області ABCDEFGHKL в площині системи координат *Oxy*. Січна площина проведена на відстані 0,4 м від центрального перерізу автомобіля (рис. 4.9).



2.

Рисунок 4.9 – Розрахункова схема:
1 – місце потрапляння пилу в салон; 2, 3 – органи дихання людини; 4 – крісло; 5 – полиця за заднім сидінням; 6 – перешкода в багажнику автомобіля, 7 – витяжний отвір, U – швидкість повітряного потоку у підвідній вентиляції.

Розміри розрахункової області: висота – 122 см, довжина – 330 см, відстань від першого сидіння до керма – 85 см, довжина від спинки заднього дивана до спинки переднього сидіння – 90 см. Місце потрапляння пилу в салон показано на рис. 4.9 – це атмосферне повітря, що потрапляє в салон та містить відому концентрацію пилу. Крім цього, приймається, що пил надходить у повітря салону внаслідок руху ніг працівників, тобто пил потрапляє також з підлоги авто.

Для моделювання концентраційного поля пилу в салоні використовується таке рівняння масопереносу [130]:

$$\frac{\partial C_d}{\partial t}+\frac{\partial uC_d}{\partial x}+\frac{\partial vC_d}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C_d}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C_d}{\partial y}\right)+\sum_{d_i=1}^{N_d}Q_{d_i}(t)\delta(x,y),$$

де $C_d(x,y,t)$ – концентрація пилу в повітрі салону авто, часток/м^3;

t – час;

u, v – компоненти вектора швидкості повітряного потоку в салоні;

μ_x, μ_y – коефіцієнти дифузії;

$Q_{d_i}(t)$ – інтенсивність емісії пилу з підлоги, часток/с;

$\delta(x, y) = \delta(x - x_i)\delta(y - y_i)$ – дельта функція Дірака;

x_i, y_i – координати джерела емісії пилу в салоні.

Зауважимо, що розглядається поширення дуже дрібних часток пилу, тому швидкість гравітаційного осадження пилу не використовується в цьому рівнянні.

Граничні умови для рівняння переносу пилу:

1. На межі входу потоку в салон авто відома концентрація пилу в повітрі $C_d = C_{d\,\text{entrance}}$.

2. На твердих стінках: стеля, підлога, сидіння – наявна умова непроникнення.

3. На межі виходу потоку із салону наявна «м'яка» гранична умова (тобто не враховується процес дифузії).

У початковий момент часу приймається, що концентрація пилу в салоні авто дорівнює нулю.

Поле швидкості повітряного потоку в салоні авто моделюється на базі моделі потенціального руху, тобто шляхом інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості P [130]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0.$$

Граничні умови для рівняння Лапласа такі:

- на місці отвору, де повітря потрапляє в салон: $\frac{\partial P}{\partial x} = U$, де U – відома швидкість повітря;

- на місці витоку повітря із салону: $P = P_0 + const$, де P_0 – константа;

- на твердих межах – умова непроникнення.

Значення компонент швидкості повітря визначаються за формулами

$$u = \frac{\partial P}{\partial x},\ v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості використовується схема розщеплення, що розглянута в п. 2.5.

Розглянемо побудову чисельної моделі на базі рівняння масопереносу пилу, що розглянуто вище. Попередньо це рівняння розщеплюється таким чином (введемо позначення $C=C_d$) [77]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right).$$

Для чисельного інтегрування першого рівняння системи (рівняння, що описує конвективний перенос пилу) використовується змінно-трикутна схема розщеплення [109]:

– на першому кроці ($k = \frac{1}{2}$) різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L^+_x C^k + L^+_y C^k = 0;$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} + L^-_x C^{n+1} + L^-_y C^{n+1} + L^-_z C^{n+1} = 0.$$

Значення різницевих операторів L_x^+, L_x^-, L_y^+ наведені в розд. 2. Значення концентрації пилу на кожному кроці розщеплення визначається за явною формулою.

Для чисельного інтегрування другого рівняння системи (рівняння, що описує перенос пилу за рахунок дифузії) використовується метод сумарної апроксимації (двокрокова схема розщеплення) [100]:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Значення концентрації пилу на кожному кроці розщеплення визначається також за явною формулою.

На базі цієї чисельної моделі створено код ION-2D. Програмування здійснено алгоритмічною мовою FORTRAN.

Далі наведено результати обчислювального експерименту на базі розробленої чисельної моделі [130]. Розглядається рух авто LADA Xray територією Придніпровської ТЕС. Приймається, що у авто потрапляє повітря з концентрацією пилу 0,025 мг/м^3 (що показано червоною лінією і позначено *D)*. Інтенсивність емісії пилу під ногами працівника, який перебуває в першому кріслі, дорівнює $Q_d = 0.0078$ мг/с, а емісія пилу поперед другого крісла $Q_d = 0.0026$ мг/с. Місце емісії пилу на підлозі показано на рис. 4.10 червоною лінію. Швидкість потрапляння повітря у авто приймалася 0.43 м/с (перший сценарій) та 0.53 м/с (другий сценарій). Коефіцієнти дифузії приймаються $\mu_x = 0.1 \cdot u(x,y)$, $\mu_y = 0.1 \cdot v(x,y)$, де *u(x,y), v(x,y)* – компоненти локальної швидкості повітряного потоку в авто. Таким чином під час моделювання враховується нерівномірне поле коефіцієнтів дифузії.

На рис. 4.10 показано поле концентрації пилу в авто для першого сценарію. Концентрація пилу надана у відсотках від максимальної концентрації $C_{d\,\max}$ в області дослідження.

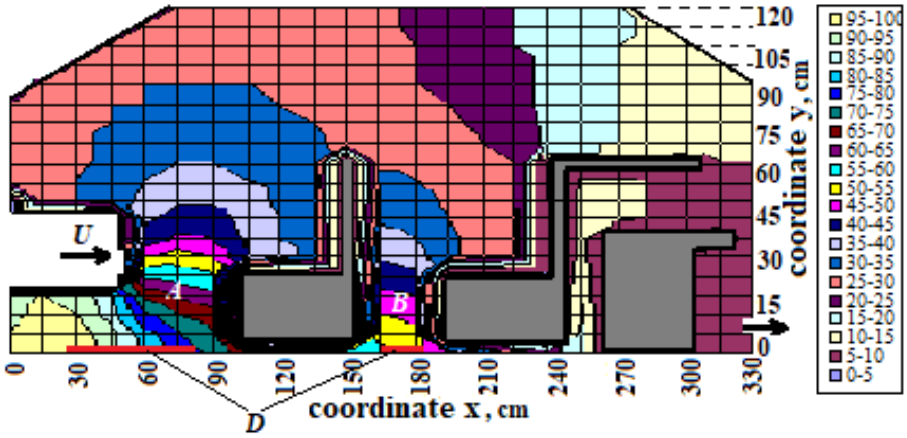


Рисунок 4.10 – Поле концентрації пилу, $C_{d\,\max}$=1,46 мг/м^3

Аналіз даних на рис. 4.10 показує, що максимальний градієнт концентрації пилу спостерігається біля крісел. Концентрація пилу в області *A* (рис. 4.10) дорівнює 80 – 50 % від максимальної концентрації у авто, в області *B* вона дорівнює 60 – 40 % від максимальної концентрації пилу. З рис. 4.10 також можна бачити підйом пилу від підлоги вгору в напрямку голови працівників, що створює загрозу потрапляння пилу в органи дихання.

Далі на рисунках наведено графіки розподілу концентрації пилу для обох сценаріїв (концентрація пилу наведена на рівні висоти крісел).

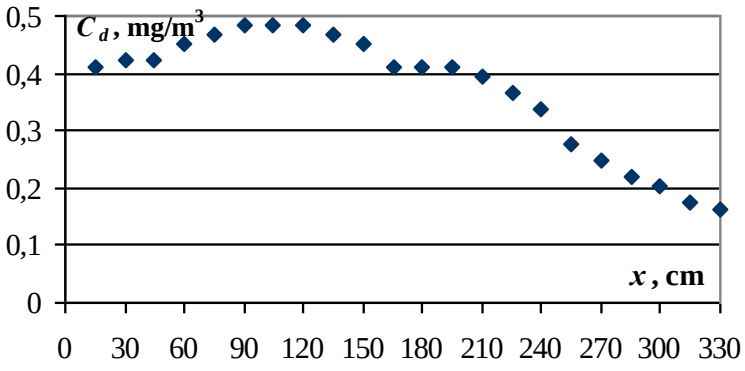


Рисунок 4.11 – Концентрація пилу на рівні висоти крісел (сценарій 1)

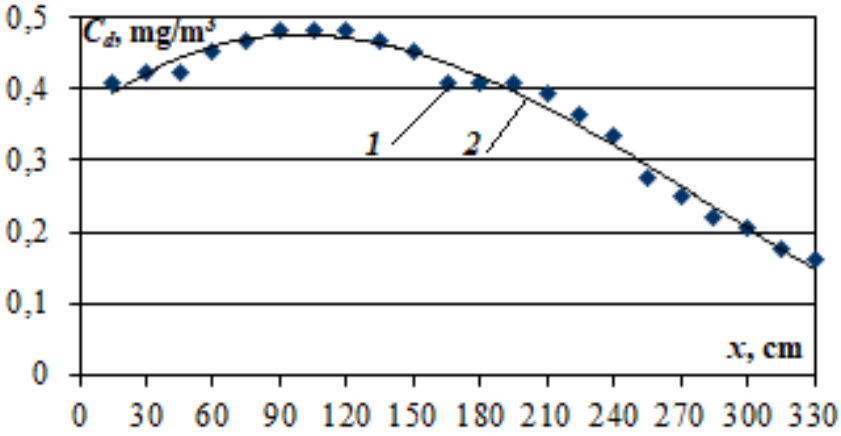


Рисунок 4.12 – Концентрація пилу на рівні висоти крісел (сценарій 2)

Аналіз даних, що наведені на рис. 4.11, 4.12, показує, що максимальне значення концентрації пилу спостерігається перед першим сидінням і становить C_d=0,48 мг/м^3. Далі концентрація зменшується, оскільки крісла є перешкодою на шляху поширення пилу, тому концентрація пилу на рівні голови другого працівника C_d 2=0,37 мг/м^3. Слід зауважити, що це значення перевищує ПДКм.р., що дорівнює 0,16 мг/м^3 для PM2.5. Наприкінці салону значення концентрації пилу становить 0,16 мг/м^3, оскільки там проявляється дія витяжної вентиляції.

При проведенні обчислювального експерименту швидкість повітряного потоку припливної вентиляції дорівнювала 0,53 м/с, тобто при збільшенні швидкості на 23 % було встановлено: максимальне значення концентрації пилу C_{dmax} зменшується на 5,5 %, локальні значення концентрації пилу зменшуються на 7–9 %. Це свідчить про те, що збільшення швидкості повітряного потоку в салоні незначно зменшує концентрацію пилу, тому що в салоні на шляху руху повітряного потоку є різного роду перешкоди, що істотно впливають на зміну структури.

Час розрахунку на базі розробленої чисельної моделі становить 15 с.

4.3 Захист робочих зон від пилового забруднення біля вугільного штабеля шляхом використання бар'єрів

Відомо, що штабелі вугілля, розташовані на території ТЕС, є потужними джерелами забруднення повітря в робочих зонах. З поверхні штабеля вугілля виносяться різні забруднюючі речовини (*CO* та ін.) [143]. Особливо інтенсивним є пилове забруднення робочих зон біля штабелів вугілля.

Для зменшення рівня пилового забруднення робочих зон пропонується використання біля штабеля спеціальних екранів. Дослідження ефективності використання цих бортів виконувалося двома шляхами: експериментальним та методом математичного моделювання.

Для виконання експериментальних досліджень використовувалося вугілля з Межиріченського ГЗК (вологість 4,6 %). Експериментальна установка розташовувалася на столі, потік повітря реалізовувався за рахунок використання повітродувки (рис. 4.13).

На рис. 4.14 показано модель штабеля вугілля. Модель має форму конуса, висота моделі 10 см, діаметр основи конуса 25 см.

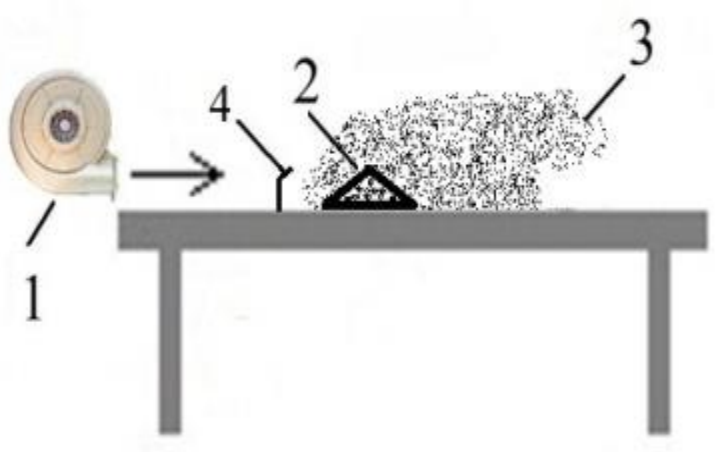


Рисунок 4.13 – Схема експериментальної установки:
1 – повітродувка; 2 – модель вугільного штабеля; 3 – зона забруднення; 4 – екран

Експеримент виконувався при температурі повітря 21 ^{0}C, вологості повітря 67 %. При проведенні експерименту як критерій подібності використовувалося число Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot L}{\nu}.$$

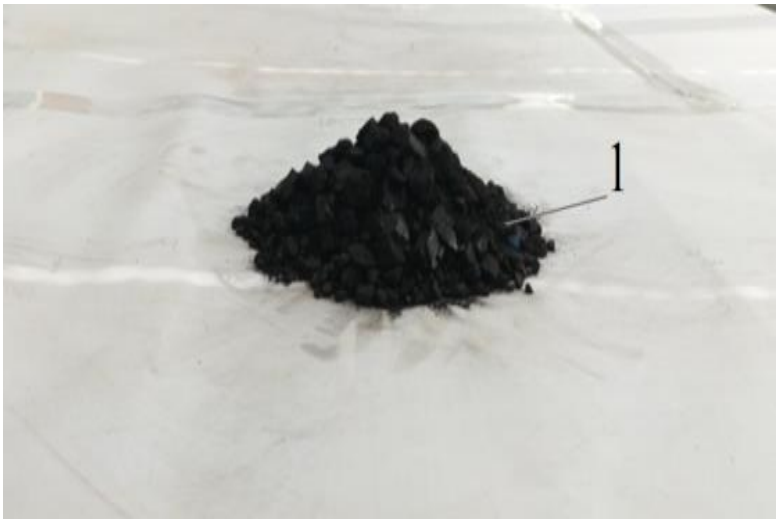


Рисунок 4.14 – Модель штабелю вугілля (сценарій 1):
1 – штабель.

При визначенні числа Рейнольдса за характерний розмір L приймався діаметр конуса, $\nu = 15.06 \cdot 10^{-6} м^2 / с$. Для вимірювання швидкості повітряного потоку використовувався анемометр GM 8908. Концентрація пилу (PM2.5) вимірювалася за допомогою вимірювача WP6910.

На рис. 4.15 показана область забруднення робочої зони біля штабеля вугілля.

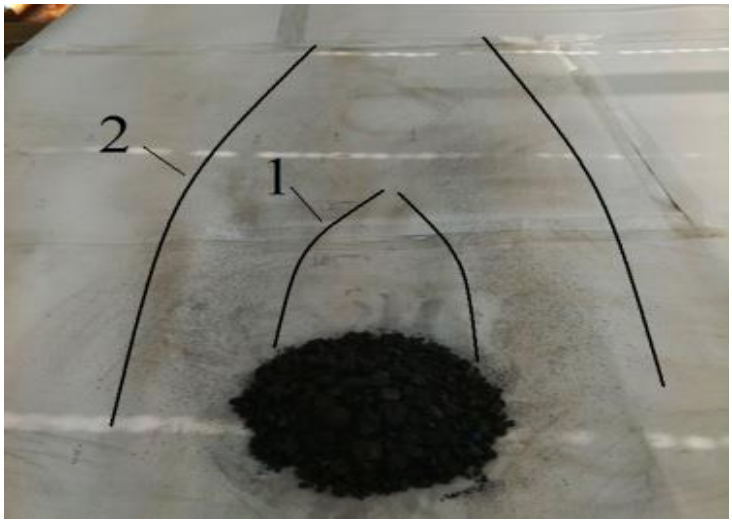


Рисунок 4.15 – Забруднення робочої зони біля штабеля вугілля (сценарій 1): 1 – область незначного забруднення; 2 – область інтенсивного забруднення.

Як можна бачити з рис. 4.15, область забруднення можна поділити на дві підзони. Перша підзона формується на навітряному боці штабеля. Вона має незначний чорний колір, тобто це не дуже забруднена зона. Формування цієї зони пояснюється тим, що штабель відіграє роль перешкоди, що зменшує локальну швидкість повітря біля поверхні штабеля на підвітряному боці, це зменшує інтенсивність емісії пилу від штабеля та зменшується інтенсивність забруднення біля штабелю.

Друга підзона формується як пояс, що покриває першу підзону. Ця підзона має темний колір, що свідчить про дуже інтенсивне забруднення.

На другому етапі досліджень виконувався експеримент, коли біля штабеля вугілля був екран, що має Г-подібну форму, та частка цього екрана під кутом 45° нахилена в напряму штабеля (сценарій 2, рис. 4.16), а також коли частка цього екрана під кутом 45° нахилена від штабеля (сценарій 3, рис. 4.17). Висота екрана 10 см. Напрям вітру показано на рисунках стрілкою.

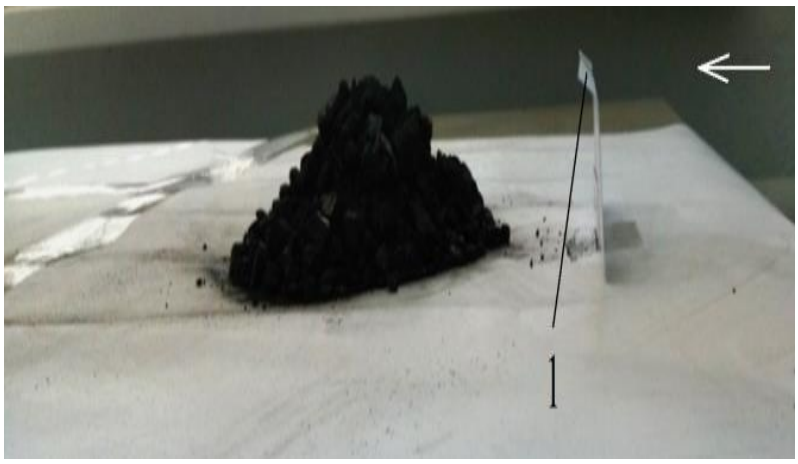


Рисунок 4.16 – Модель штабеля вугілля з екраном (сценарій 2):
1 – екран.

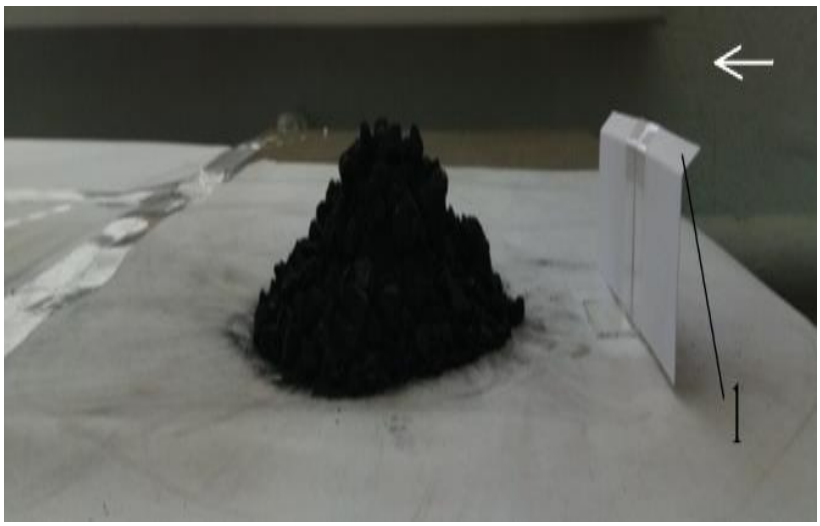


Рисунок 4.17 – Модель штабеля вугілля з екраном (сценарій 3):
1 – екран.

Слід зауважити, що форми зони забруднення для сценарію 2 та сценарію 3, як для сценарію 1, не наведені. Це пов’язано з тим, що фотоапаратура, що використовувалася під час експерименту, не змогла зафіксувати цю зону забруднення. Це опосередковано підтверджує захисну функцію цих екранів, а саме: зменшення інтенсивності виносу пилу від штабеля.

У табл. 4.5 наведено значення середньої концентрації пилу (PM2.5) на різній відстані від штабеля. Дані наведені для швидкості повітря 9,8 м/с. Концентрація вимірювалася на висоті, що дорівнює висоті штабеля.

Таблиця 4.5 – Середня концентрація вугільного пилу (PM2.5)

Відстань	Концентрація пилу, μg/m^3		
	Сценарій 1 (немає екрана)	Сценарій 2	Сценарій 3
0,5*L*	239	28	12
L	122	11	5
1,5*L*	33	5	3

Аналізуючи дані з табл. 4.5, можна зробити висновок: екрани, що мають Г-подібну геометричну форму, дозволяють ефективно зменшувати рівень пилового забруднення повітря біля штабеля вугілля. Так, для сценарію 3 концентрація пилу на відстані 1,5L від штабеля зменшується майже в 11 разів. Це дозволяє знизити ризик виникнення професійних захворювань у працівників.

На другому етапі досліджень було розроблено математичну модель. Мета створення моделі – науково обґрунтоване оцінювання рівня забруднення повітря робочих зон біля штабелів вугілля з екранами.

Розроблена модель враховує такі фактори:

1. Геометричну форму штабеля вугілля.

2. Геометричну форму захисного екрана.

3. Вплив повітряного потоку на формування областей пилового забруднення в робочих зонах.

4. Вплив дифузії на формування областей пилового забруднення в робочих зонах.

5. Нерівномірність емісії пилу від різних ділянок поверхні штабелю вугілля.

Розроблена модель орієнтована на розв’язання таких прикладних задач:

1. Визначення поля концентрації пилу в області дослідження, що характеризується складною внутрішньою геометрією (штабелі вугілля мають не канонічну форму, наприклад прямокутну або просто точкове джерело, а складну форму поверхні).

2. Визначення концентрації пилу в робочих зонах, що розташовані біля штабелів вугілля.

3. Можливість проведення досліджень (моделювання) для захисних екранів різної геометричної форми, що планується розташовувати біля штабеля вугілля з метою зниження рівня забруднення робочих зон.

Моделюючі рівняння моделі (рівняння Нав'є-Стокса) [38, 109]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u\omega}{\partial x} + \frac{\partial v\omega}{\partial y} = \frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right), \tag{4.1}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \tag{4.2}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = div(\mu \cdot gradC) + \sum_{i=1}^{N} Q_i(t)\delta(x-x_i)\delta(y-y_i), \tag{4.3}$$

де $\omega = \partial v/\partial x - \partial u/\partial y$ – вихор;

$\mathrm{Re} = V_0 L/\upsilon$ – число Рейнольдса (V_0 – характерна швидкість; L – характерний розмір; υ – кінематичний коефіцієнт в'язкості);

ψ – функція току;

$u = \partial\psi/\partial y$, $v = -\partial\psi/\partial x$ – компоненти вектора швидкості повітряного потоку;

C – концентрація вугільного пилу;

μ_x, μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії;

w – швидкість гравітаційного осадження пилу;

Q – інтенсивність емісії вугільного пилу від поверхні штабеля;

$\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака;

x_i, y_i – декартові координати;

t – час.

Інтенсивність емісії вугільного пилу від поверхні штабеля розраховується на базі емпіричної залежності (3.4).

Для моделюючих рівнянь використовуються такі граничні умови [109]:

– тверді межі, а також верхня та нижня межі:

$$\psi\big|_{\Gamma} = \text{const},$$

$$\left.\frac{\partial\psi}{\partial n}\right|_{\Gamma} = 0;$$

– на межі припливу повітряного потоку задається значення $u=f(y)$ та умова:

$$\psi\big|_{вхід} = \psi(y),$$

$$\omega = 0.$$

На межі виходу повітряного потоку задається «м'яка» умова [99].

Чисельна модель на базі рівнянь (4.1) – (4.3) будується з використанням прямокутної різницевої сітки.

Розглянемо побудову чисельної моделі. Так, для розв'язання рівняння (4.1) здійснюється його розщеплення таким чином:

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} + \frac{\partial u\omega}{\partial x} + \frac{\partial\nu\omega}{\partial y} = 0; \qquad (4.4)$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} = \frac{1}{\text{Re}}\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right). \qquad (4.5)$$

Для чисельного розв'язання рівняння переносу (4.4) використовується двокрокова схема розщеплення [109]:

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{\omega_{i,j}^{k}-\omega_{i,j}^{n}}{\Delta t}+L^{+}{}_{x}\omega^{k}+L^{+}{}_{y}\omega^{k}=0; \tag{4.6}$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1}-\omega_{i,j}^{k}}{\Delta t}+L^{-}{}_{x}\omega^{n+1}+L^{-}{}_{y}\omega^{n+1}=0; \tag{4.7}$$

У формулах (4.6), (4.7) використовують такі залежності:

$$\frac{\partial u\omega}{\partial x}=\frac{\partial u^{+}\omega}{\partial x}+\frac{\partial u^{-}\omega}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v\omega}{\partial y}=\frac{\partial v^{+}\omega}{\partial y}+\frac{\partial v^{-}\omega}{\partial y},$$

$$u^{+}=\frac{u+|u|}{2},\ u^{-}=\frac{u-|u|}{2},$$

$$v^{+}=\frac{v+|v|}{2},\ v^{-}=\frac{v-|v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^{+}\omega}{\partial x}\approx\frac{u_{i+1,j}^{+}\omega_{i,j}^{n+1}-u_{i,j}^{+}\omega_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x}=L_{x}^{+}\omega^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^{-}\omega}{\partial x}\approx\frac{u_{i+1,j}^{-}\omega_{i+1,j}^{n+1}-u_{i,j}^{-}\omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta x}=L_{x}^{-}\omega^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^{+}\omega}{\partial y}\approx\frac{v_{i,j+1}^{+}\omega^{n+1}{}_{i,j}-v_{i,j}^{+}\omega^{n+1}{}_{i,j-1}}{\Delta y}=L_{y}^{+}\omega^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^{-}\omega}{\partial y}\approx\frac{v_{i,j+1}^{-}\omega^{n+1}{}_{i,j+1}-v_{i,j}^{-}\omega^{n+1}{}_{i,j}}{\Delta y}=L_{y}^{-}\omega^{n+1}.$$

Невідоме значення ω у кожному рівнянні (4.6), (4.7) визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного розв’язання рівняння (4.5) використовується така різницева схема розщеплення [100]:

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}-\omega_{i,j}^{n}}{\Delta t}=\left[\frac{-\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+\omega_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\mathrm{Re}\,\Delta x^2}\right]+\left[\frac{-\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+\omega_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\mathrm{Re}\,\Delta y^2}\right],$$
$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1}-\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t}=\left[\frac{\omega_{i+1,j}^{n+1}-\omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2\,\mathrm{Re}}\right]+\left[\frac{\omega_{i,j+1}^{n+1}-\omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2\,\mathrm{Re}}\right]. \qquad (4.8)$$

Невідоме значення ω у кожному рівнянні (4.8) визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Після обчислення значення вихору в області дослідження розв’язується рівняння для функції ψ.

Для визначення значення функції току в області дослідження, що має складну геометричну форму, використовуються дві різницеві схеми. Перша схема розщеплення для чисельного визначення функції току будується для «нестаціонарного» рівняння, що має вигляд [109]:

$$\frac{\partial\psi}{\partial\eta}=\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\omega.$$

де η – фіктивний час.

Різницева схема розщеплення має вигляд [109]:

$$\psi_{ij}^{\,n+1/4}=\psi_{ij}^{n}+0.5\omega\Delta\eta,$$
$$\frac{\psi_{i,j}^{n+2/4}-\psi_{i,j}^{n+1/4}}{0,5\Delta\eta}=\frac{\psi_{i+1,j}^{n+1/4}-\psi_{i,j}^{n+1/4}}{\Delta x^2}+\frac{-\psi_{i,j}^{n+2/4}+\psi_{i-1,j}^{n+2/4}}{\Delta x^2}+$$
$$+\frac{\psi_{i,j+1}^{n+1/4}-\psi_{i,j}^{n+1/4}}{\Delta y^2}+\frac{-\psi_{i,j}^{n+2/4}+\psi_{i,j-1}^{n+4}}{\Delta y^2},$$
$$\frac{\psi_{i,j}^{n+3/4}-\psi_{i,j}^{n+2/4}}{0,5\Delta\eta}=\frac{\psi_{i+1,j}^{n+3/4}-\psi_{i,j}^{n+3/4}}{\Delta x^2}+\frac{-\psi_{i,j}^{n+2/4}+\psi_{i-1,j}^{n+2/4}}{\Delta x^2}+$$
$$+\frac{\psi_{i,j+1}^{n+3/4}-\psi_{i,j}^{n+3/4}}{\Delta y^2}+\frac{-\psi_{i,j}^{n+2/4}+\psi_{i,j-1}^{n+2/4}}{\Delta y^2},$$

$$\psi_{ij}^{n+1} = \psi_{ij}^{n+3/4} + 0.5\omega\Delta\eta,$$

де $\omega_{ij} = \frac{1}{4}\left(\omega_{ij} + \omega_{i-1,j} + \omega_{i,j-1} + \omega_{i-1,j-1}\right)$.

Невідоме значення функції току на кожному дрібному кроці знаходиться за «рахунком, що біжить».

Після розрахунку функції току розраховуємо швидкість повітряного потоку так:

$$u_{ij} = \left(\psi_{i,j+1} - \psi_{ij}\right)/\Delta y;$$

$$\nu_{ij} = -\left(\psi_{i+1,j} - \psi_{ij}\right)/\Delta x.$$

Друга різницева схема для чисельного розв'язання рівняння Пуасона для функції току має вигляд [99]:

$$\frac{\psi_{i+1,j,k} - 2\psi_{i,j,k} + \psi_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{\psi_{i,j+1,k} - 2\psi_{i,j,k} + \psi_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} = -\omega_{ij}. \qquad (4.9)$$

Невідоме значення параметра ψ визначається з (4.9) за явною формулою.

Для чисельного розв'язання рівняння (4.3) використовується різницева схема розщеплення, що розглянута в п. 3.3. Значення коефіцієнтів дифузії визначається за залежностями, що аналізувалися в п. 2.1.

На базі розробленої чисельної моделі створено код COAL, мова програмування – FORTRAN. До складу коду входять:

– NE0.DAT – файл початкових даних;

– NE1 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку поля вихору в області дослідження;

– NE10 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку функції току в області дослідження;

– NE2 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку поля швидкості повітряного потоку в області дослідження;

– NE3 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні рівняння переносу для вихору;

– NE30 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні нестаціонарного рівняння дифузії для вихору;

– NE4 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку рівняння переносу пилу за рахунок конвекції;

– NE5 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку рівняння переносу пилу за рахунок дифузії;

–NE6 – підпрограма типу SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні рівняння конвективного переносу пилу;

– NE7 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля концентрації пилу в області дослідження;

– NE8 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку інтенсивності емісії пилу від поверхні штабеля.

Алгоритм розв’язання задачі такий:

1. У файл початкових даних вводиться інформація щодо форми екрана перед штабелем, геометричної форми поверхні штабеля вугілля, швидкості руху повітряного потоку та таке інше.

2. Здійснюється чисельне розв’язання рівняння для переносу вихору.

3. Здійснюється чисельне розв’язання рівняння для функції току.

4. Визначається поле швидкості повітряного потоку в області дослідження.

5. Розраховується інтенсивність виносу пилу від різних ділянок поверхні штабеля.

6. Розраховується зміна концентрації пилу внаслідок емісії.

7. Розраховується процес конвективного та дифузійного переносу забруднювачів у області дослідження.

8. Здійснюється друк поля концентрації пилу в робочій зоні.

Вихідні дані для моделювання:

1. Дані щодо геометричної форми штабеля вугілля та його розмірів.

2. Розміри розрахункової області.

3. Форма та розміри екрана, його розташування відносно штабеля вугілля.

4. Швидкість повітряного потоку.

Для верифікації побудованої чисельної моделі була розв'язана відома тестова задача про течію в прямокутному каналі, що була досліджена експериментальним шляхом [187]. Розміри каналу 200 см × 50 см × 30 см; рідина потрапляє в канал крізь отвір шириною b = 50 см, висотою h_i=10 см. Експеримент виконувався при витратах Q=2 л/с.

У табл. 4.6 наведено дані щодо значення швидкості течії в каналі, що були отримані експериментальним шляхом та розрахунковим у роботі [187], а також за допомогою побудованої моделі (розрахунок здійснювався при $Re=10^5$, за характерний розмір приймалася довжина каналу, швидкість 5 см/с, кінематичний коефіцієнт дифузії 10^{-6} м^2/с).

Таблиця 4.6 – Значення швидкості потоку в каналі на різній відстані від входу

Відстань x, см	Розрахунок на базі побудованої моделі, см/с	Розрахунок за [187], см/с	Експеримент за [187], см/с
10	3,58	4,00	4,20
46	3,62	4,00	4,00
82	3,71	4,00	3,80

Аналізуючи дані з табл. 4.6, можна зробити висновок про задовільне узгодження результатів, що були отримані на базі розробленої моделі, з даними експерименту та розрахунком інших авторів.

Далі на базі побудованої математичної моделі було виконано обчислювальний експеримент для таких сценаріїв:

1. Біля штабеля вугілля був екран, що має Г-подібну форму, і частина цього екрана під кутом 45^0 нахилена в напрямку штабеля (сценарій 1).

2. Біля штабеля вугілля був екран, що має Г-подібну форму, і частина цього екрана під кутом 45^0 нахилена в напрямку вітру (сценарій 2).

3. Біля штабеля вугілля був екран, що має Т-подібну форму (сценарій 3).

4. Біля штабеля вугілля був екран, що має Г-подібну форму та частка цього екрана під кутом 90^0 нахилена в напрямку штабеля + вертикальний екран на штабелі (сценарій 4).

На рис. 4.18 наведено поле концентрації пилу біля штабеля вугілля при таких початкових даних: швидкість повітря 1,7 м/с; висота екрана 2,8 м; висота штабеля 5,7 м; довжина штабеля 7,9 м; довжина від екрана до штабеля 4,4 м; довжина додаткового елемента на екрані 0,9 м (сценарій 1). Винос вугільного пилу від різних ділянок штабеля розраховується на базі емпіричної формули, що розглянута в попередньому розділі.

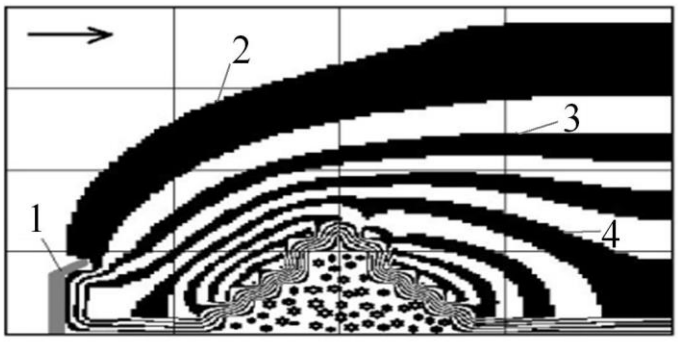


Рисунок 4.18 – Ізолінії концентрації пилу біля штабеля вугілля (сценарій 1): 1 – екран; 2 – C=0,23 мг/м^3; 3 – C=1,65 мг/м^3; 4 – C=3,54 мг/м^3.

У табл. 4.7 наведено значення концентрації пилу в робочій зоні за штабелем для сценарію 1 (рівень 1.7 м від поверхні землі) та на різній відстані від штабелю.

Таблиця 4.7 – Концентрація пилу в робочій зоні за штабелем

Відстань X, м	1	2	3
C, мг/м^3	5,37	4,73	4,24

На рис. 4.19 наведено поле концентрації пилу біля штабеля вугілля за початкових даних, як для попередньої задачі.

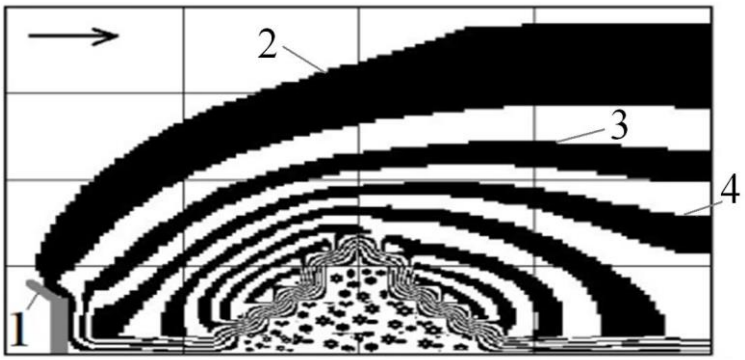


Рисунок 4.19 – Ізолінії концентрації пилу біля штабеля вугілля:
1 – екран (сценарій 2); 2 – C=0,25 мг/м^3; 3 – C=1,79 мг/м^3; 4 – C=2,81 мг/м^3.

У табл. 4.8 наведено значення концентрації пилу в робочій зоні за штабелем для сценарію 2 (рівень 1,7 м від поверхні землі).

Таблиця 4.8 – Концентрація пилу в робочій зоні за штабелем

Відстань X, м	1	2	3
C, мг/м^3	5,66	4,90	4,28

На рис. 4.20 наведено поле концентрації пилу біля штабеля вугілля (сценарій 3) за таких початкових даних: швидкість повітря 2,01 м/с; висота

екрана 7 м; висота штабеля 5,3 м; довжина штабеля 7,9 м; відстань від екрана до штабеля 1,8 м; довжина додаткового елемента на екрані 0,9 м.

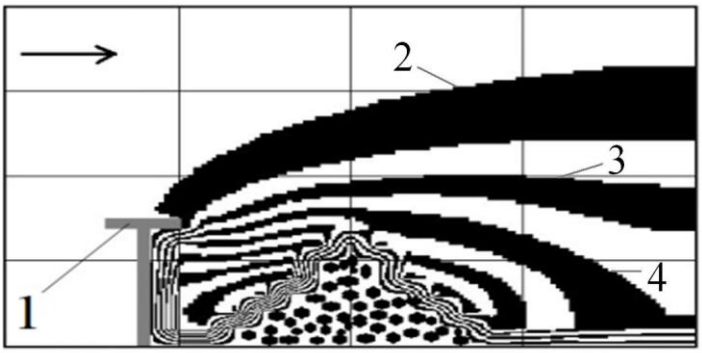


Рисунок 4.20 – Ізолінії концентрації пилу біля штабеля вугілля:
1 – екран (сценарій 3); 2 – C=1,06 мг/м^3; 3 – C=2,48 мг/м^3; 4 – C=3,90 мг/м^3.

У табл. 4.9 наведено значення концентрації пилу в робочій зоні за штабелем для сценарію 3 (рівень 1,7 м від поверхні землі).

Таблиця 4.9 – Концентрація пилу в робочій зоні за штабелем

Відстань X, м	1	2	3
C, мг/м^3	5,31	4,66	4,13

На рис. 4.21 показано поле концентрації пилу біля штабеля вугілля (сценарій 4) за початкових даних, як для сценарію 3.

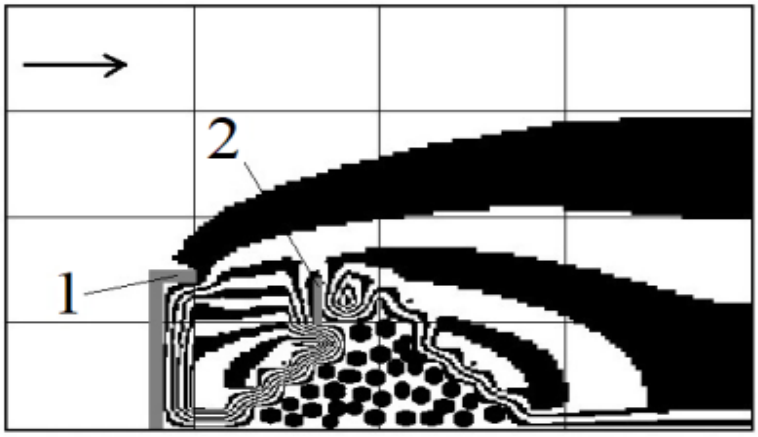


Рисунок 4.21– Ізолінії концентрації пилу біля штабеля вугілля:

1 – екран (сценарій 4); 2 – екран; 3 – C=0,23 мг/м^3; 4 – C=1,65 мг/м^3; 5 – C=3,54 мг/м^3.

У табл. 4.10 показані значення концентрації пилу в робочій зоні за штабелем для сценарію 4 (рівень 1,7 м від поверхні землі).

Таблиця 4.10 – Концентрація пилу в робочій зоні за штабелем

Відстань X, м	1	2	3
C, мг/м^3	5,21	4,59	3,97

Якщо проаналізувати наведені вище рисунки, то можна визначити закономірність формування зон забруднення біля штабеля з екраном, а саме: присутність екрана створює області з високим градієнтом концентрації пилу між екраном та передньою поверхнею штабеля. Це пов’язано з впливом екрана на аеродинаміку потоку та на характер поширення часток пилу від поверхні штабеля вгору.

Таким чином, використовуючи побудовану математичну модель, можливо науково обґрунтовано визначити форму областей пилового забруднення біля штабеля, концентрацію пилу в робочих зонах залежно від положення захисного екрана та для конкретних місцевих умов експлуатації.

Час розрахунку становить 10 с.

На наступному етапі досліджень була розроблена тривимірна математична модель для експертного оцінювання рівня забруднення повітря в робочих зонах біля штабелів вугілля, де також розташовано захисний екран. Моделюючі рівняння моделі [109]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}=0 \quad . \tag{4.10}$$

$$u=\frac{\partial P}{\partial x}\ ,\ v=\frac{\partial P}{\partial y},\quad w=\frac{\partial P}{\partial z}\ . \tag{4.11}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}+\frac{\partial (w-w_s)C}{\partial z}=$$

$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial C}{\partial z}\right)+$$

$$+\sum Q_i\delta\left(x-x_i\right)\delta\left(y-y_i\right)\delta\left(z-z_i\right), \tag{4.12}$$

де P – потенціал швидкості;

C – концентрація вугільного пилу;

μ_x,μ_y,μ_z – коефіцієнти турбулентної дифузії;

w_s – швидкість гравітаційного осадження часток пилу;

u, v, w – компоненти вектора швидкості повітряного потоку;

Q – інтенсивність емісії вугільного пилу від поверхні штабеля;

$\delta(x-x_i),\delta(y-y_i),\delta(z-z_i)$ – дельта-функція Дірака;

x_i, y_i, z_i – декартові координати;

t – час.

Крайові умови для моделюючих рівнянь аналогічні, як для рівнянь моделі, що розглянуті в попередньому параграфі.

Інтенсивність емісії вугільного пилу від поверхні штабеля розраховується на базі емпіричної залежності (3.4).

Для чисельного розв'язання рівняння (4.11) використовується явна різницева схема. Попередньо рівняння Лапласа для потенціалу швидкості записується так [109]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \tag{4.13}$$

де t – фіктивний час.

Різницева схема для рівняння (4.13) має вигляд [99]:

$$P_{ijk}^{n+1} = P_{ijk}^{n} + \Delta t \frac{P_{i+1,j,k}^{n} - 2P_{ijk}^{n} + P_{i-1,j,k}^{n}}{\Delta x^2} +$$

$$+\Delta t \frac{P_{i,j+1,k}^{n} - 2P_{ijk}^{n} + P_{i,j-1,k}^{n}}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{P_{i,j,k+1}^{n} - 2P_{ijk}^{n} + P_{i,j,k-1}^{n}}{\Delta z^2}. \tag{4.14}$$

На початку розрахунку потрібно задати значення потенціалу швидкості в розрахунковій області, наприклад $P = 0$. Розрахунок закінчується, коли виконується умова:

$$\left| P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число;

n – номер ітерації.

Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу (4.12) здійснюється таке його розщеплення:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right), \tag{4.15}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial wC}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial C}{\partial z}\right), \tag{4.16}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\sum Q_i\delta\left(x-x_i\right)\delta\left(y-y_i\right)\delta\left(z-z_i\right), \tag{4.17}$$

Тут ми приймаємо, що $w=w-w_s$.

Для чисельного інтегрування (4.16) використовуємо таку поперемінно-трикутну різницеву схему [109]:

- перший крок розщеплення:

$$C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}}=C_{ijk}^{n}-\triangle t\frac{w_{i+1jk}^{+}C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}}-w_{ijk}^{+}C_{i-1j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\triangle z}+$$
$$+\triangle t\mu_z\frac{-C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}}+C_{i-1jk}^{n+\frac{1}{2}}}{\triangle z^2}+\triangle t\mu_z\frac{-C_{ijk}^{n}+C_{i+1jk}^{n}}{\triangle z^2},$$

- другий крок розщеплення:

$$C_{ijk}^{n+1}=C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}}-\triangle t\frac{w_{i+1jk}^{-}C_{i+1jk}^{n+1}-w_{ijk}^{-}C_{ijk}^{n+1}}{\triangle z}+$$
$$+\triangle t\mu_z\frac{-C_{ijk}^{n+\frac{1}{2}}+C_{i-1jk}^{n+\frac{1}{2}}}{\triangle z^2}+\triangle t\mu_z\frac{-C_{ijk}^{n+1}+C_{i+1jk}^{n+1}}{\triangle z^2}.$$

На кожному кроці розщеплення невідоме значення концентрації пилу визначається за явною формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування рівняння (4.15) здійснимо його розщеплення таким чином [77]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}=0.$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right).$$

Далі використовуються такі різницеві схеми розщеплення:

1. Для чисельного розв'язання рівняння конвективного переносу пилу використовується двокрокова схема розщеплення [109]:

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{C^k_{i,j,k}-C^n_{i,j,k}}{\Delta t}+L^+_x C^k+L^+_y C^k=0;$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{C^{n+1}_{i,j,k}-C^k_{i,j,k}}{\Delta t}+L^-_x C^{n+1}+L^-_y C^{n+1}=0.$$

2. Для чисельного розв'язання рівняння дифузійного переносу пилу використовується така двокрокова схема розщеплення [100]:

$$\frac{C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k}-C^n_{i,j,k}}{\Delta t}=\left[\mu_x\frac{-C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k}+C^{n+\frac{1}{2}}_{i-1,j,k}}{\Delta x^2}\right]+\left[\mu_y\frac{-C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k}+C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j-1,k}}{\Delta y^2}\right],$$

$$\frac{C^{n+1}_{i,j,k}-C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j,k}}{\Delta t}=\left[\mu_x\frac{C^{n+1}_{i+1,j,k}-C^{n+1}_{i,j,k}}{\Delta x^2}\right]+\left[\mu_y\frac{C^{n+1}_{i,j+1,k}-C^{n+1}_{i,j,k}}{\Delta y^2}\right].$$

Позначки різницевих операторів L^+_x, L^-_x, L^+_y... наведено вище.

У цих схемах розщеплення на кожному кроці невідоме значення

концентрації пилу визначається за явною формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного розв'язання рівняння (4.17) використовується метод Ейлера. Розрахункова залежність для визначення концентрації пилу за методом Ейлера [100]:

$$C_{ijk}^{n+1} = C_{ijk}^{n} + \triangle t \sum Q_i \delta(x - x_i)\delta(y - y_i)\delta(z - z_i).$$

На базі розробленої чисельної моделі створено код COAL-3V, мова програмування – FORTRAN.

До складу коду входять:

CA1 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку поля швидкості повітряного потоку в робочих зонах;

CA3 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку поширення вугільного пилу в повітрі робочих зон за рахунок дифузії;

CA4 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку потенціалу швидкості;

CA4 – для розрахунку рівняння переносу пилу за рахунок конвекції;

CA04 – для розрахунку рівняння переносу пилу у вертикальному напряму;

CA42 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку концентрації пилу в повітрі робочих зон за методом Ейлера;

CA6 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку результатів розрахунку;

CC0.DAT – файл початкових даних;

CNE8 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку інтенсивності емісії пилу від поверхні штабеля.

Алгоритм розв'язання задачі такий:

1. У файл початкових даних вводиться інформація щодо форми штабеля або групи штабелів, швидкості руху повітряного потоку, положення та розміри захисного екрана тощо.

2. Здійснюється чисельний розв’язок рівняння для потенціалу швидкості.

3. Здійснюється розрахунок поля швидкості повітряного потоку в робочих зонах.

4. Розраховується інтенсивність виносу пилу від різних ділянок поверхні штабелю.

5. Визначається поле концентрації вугільного пилу в області дослідження.

6. Здійснюється друк поля концентрації пилу в робочої зоні.

Вихідні дані для моделювання:

1. Дані щодо геометричної форми штабелів вугілля, розміри та положення захисного екрана.

2. Розміри розрахункової області.

3. Швидкість повітряного потоку.

4. Положення різних об’єктів в області дослідження.

Для тестування розробленої моделі була розв’язана задача, що має аналітичний розв’язок. Ця задача використовується для верифікації чисельних моделей, що базуються на інтегруванні нестаціонарного рівняння вигляду (4.13). Розглядається процес теплопровідності в тривимірній пластині, початкова температура якої дорівнює T_0, на усіх межах температура постійна та дорівнює 0. Аналітичний розв’язок задачі [89]:

$$T = T_0 \cdot \mathrm{erf}(\frac{x}{2\sqrt{at}}) \cdot \mathrm{erf}(\frac{y}{2\sqrt{at}}) \cdot \mathrm{erf}(\frac{z}{2\sqrt{at}}).$$

Значення температури розраховується для точок x = 1 м, y = 1 м, z=1 при a = 1, T_0=2600 ^{0}C.

У табл. 4.11 наведено результати розрахунку температури на базі аналітичного розв’язку та побудованої чисельної моделі.

Таблиця 4.11 – Значення температури, °С

Час *t*, с	Розрахунок на базі аналітичної залежності	Розрахунок на базі чисельної моделі
9,76	14,82	15,23
12,76	9,86	10,1
17,30	6,24	6,45

Дані з табл. 4.11 свідчать про адекватність розробленої чисельної моделі.

Крім цього, була виконана верифікація побудованої чисельної моделі, на базі якої здійснюється розрахунок поширення пилу в повітрі. Для верифікації використовувався аналітичний розв'язок тривимірного рівняння (4.12), що наведено в [5]. Розрахунок на базі побудованої чисельної моделі здійснювався для таких даних [5]: швидкість повітряного потоку W = 4 м/с; $\mu_x = \mu_y = 500 \text{м}^2/\text{с}$; Y = 0; висота викиду домішки 120 м; розрахунковий рівень 120 м; інтенсивність емісії домішки $Q = 106$ мг/с; $\mu_z = 5 \text{м}^2/\text{с}$.

У табл. 4.12 наведено дані щодо значення концентрації домішки на різній відстані від джерела емісії.

Таблиця 4.12– Концентрації домішки, мг/м^3

Відстань *X*, км	Аналітичний розв'язок [5]	Розрахунок на базі розробленої моделі/ розрахунок [5]
1	1,59	1,7/1,8
2	0,79	0,84/0,9
3	0,54	0,57/0,6
4	0,42	0,45/0,5

Дані з табл. 4.12 свідчать про адекватність розробленої чисельної моделі.

На базі побудованої математичної моделі було виконано обчислювальний експеримент для таких сценаріїв:

1. Розташовано два штабелі вугілля, екран – відсутній (сценарій 1).

2. Розташовано два штабелі вугілля, екран – між штабелями (сценарій 2).

3. Розташовано два штабелі вугілля, екран – за другим штабелем (сценарій 3).

Мета розрахунку – визначити вплив екрана на зниження рівня пилового забруднення робочої зони за другим штабелем. Розрахунок виконувався за таких початкових даних: розміри розрахункової області 77,5 м × 28 м × 24 м; швидкість повітря 2 м/с; висота екрана 2,8 м; довжина першого штабеля 24,8 м, висота 5,3 м; довжина другого штабеля 15,5 м, висота 5,3 м. Винос вугільного пилу від різних ділянок штабеля розраховується на базі емпіричної формули, що розглянута в попередньому розділі.

Нижче на рисунках показано ізолінії концентрації пилу в перерізі y=12 м.

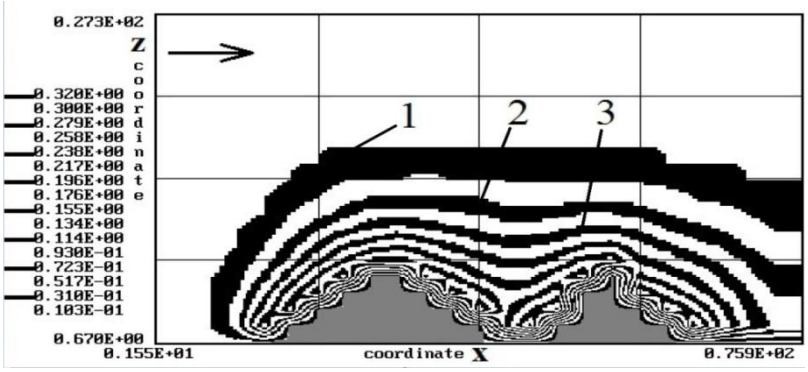


Рисунок 4.22 – Ізолінії концентрації пилу біля штабеля вугілля (сценарій 1): 1 – C=0,23 мг/м^3; 2 – C=1,65 мг/м^3; 3 – C=3,54 мг/м^3.

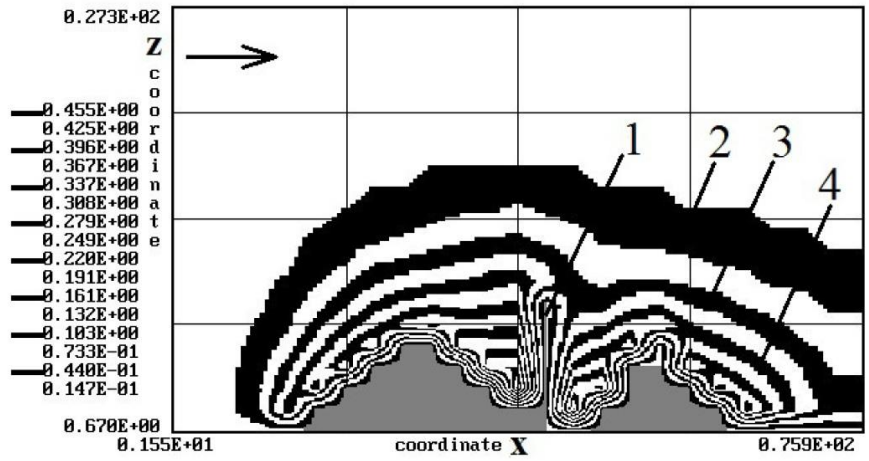


Рисунок 4.23 – Ізолінії концентрації пилу біля штабеля вугілля (сценарій 2):
1 – екран (сценарій 2); 2 – екран; 3 – C=0,23 мг/м^3; 4 – C=1,65 мг/м^3.

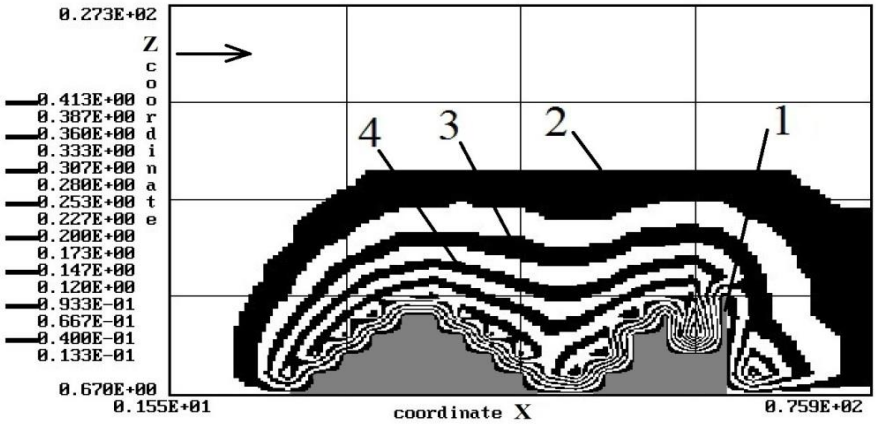


Рисунок 4.24 – Ізолінії концентрації пилу біля штабеля вугілля (сценарій 3):
1 – екран (сценарій 3); 2 – екран; 3 – C=0,23 мг/м^3; 4 – C=1,65 мг/м^3.

Як можна бачити з наведених рисунків, біля штабелів вугілля формується складна зона пилового забруднення, що пов’язано із взаємним впливом викидів від кожного штабелю.

У табл. 4.13 показано значення концентрації вугільного пилу в робочій зоні за другим штабелем вугілля для кожного сценарію (переріз y=12 м).

Як можна бачити з табл. 4.13, найбільш ефективним є захист від пилового забруднення робочої зони у випадку, коли захисний екран

розташовано за другим штабелем вугілля (сценарій 3). У разі розташування захисного екрана між штабелями (сценарій 2) зменшення рівня пилового забруднення робочої зони практично не відбувається. Таким чином, використання побудованої тривимірної моделі надає можливість науково обґрунтовано здійснювати вибір місця розташування захисного екрана.

Таблиця 4.13 – Значення концентрації пилу в робочої зоні, г/м^3

Відстань *X*, м	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
1	0,220	0,21	0,13
2	0,15	0,14	0,08
3	0,11	0,10	0,05
4	0,081	0,077	0,003

Зауважимо, що час розрахунку становить 10 с.

Далі наведено результати верифікації побудованої тривимірної моделі. Для її верифікації було виконано лабораторний експеримент. Джерелом «забруднення» був іонізатор AirNASA KJF03 (рис. 4.25). Цей іонізатор було розташовано на моделі цистерни. Біля моделі була розташована пластина, що моделювала захисний екран. Концентрація негативних іонів вимірювалася за допомогою приладу AIR ION TESTER KT-401. Для створення потоку повітря використовувалася повітродувка. Швидкість повітряного потоку визначалася за допомогою приладу GM 8908.

Експеримент виконувавсяза таких параметрах: викид іонів 10^7 часток/с; швидкість потоку 0,15–0,21 м/с; висота джерела емісії 14 см; розміри екрана 16 см × 2 см × 8 см; довжина від джерела емісії до екрана 12 см. Замір концентрації іонів здійснювався на висоті 10 см. При теоретичному визначенні концентрації іонів приймалося, що швидкість потоку 0,2 м/с.

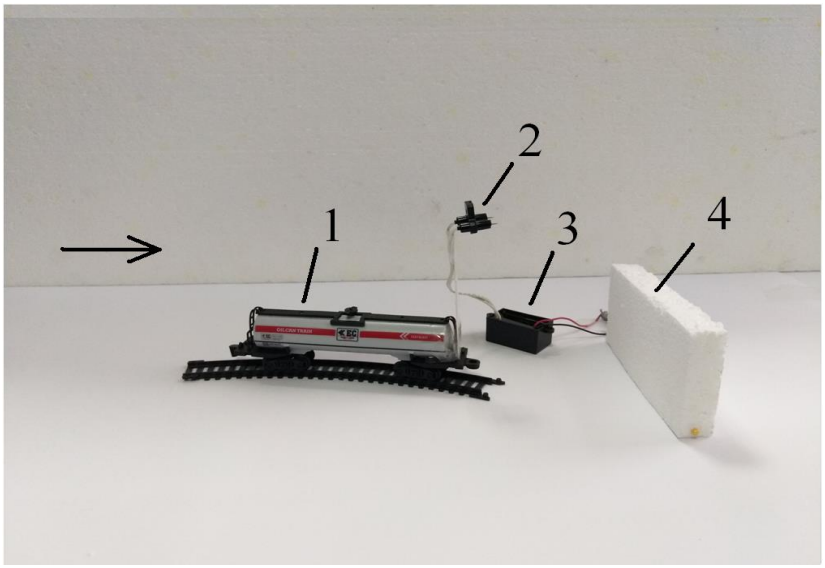


Рисунок 4.25 – Експериментальне обладнання:
1 – модель цистерни; 2 – іонізатор; 3 – живлення іонізатора; 4 – захисний екран.

У табл. 4.14 наведено дані щодо експериментального значення концентрації іонів порівняно з теоретичним розрахунком.

Таблиця 4.14 – Концентрація іонів, часток/см^3

Відстань *x*, см	Експеримент	Розрахунок
5	$(2{,}42–2{,}61)\times10^4$	$2{,}67\times10^4$
10	$(1{,}72–2{,}04)\times10^4$	$2{,}34\times10^4$
15	$(1{,}24–1{,}76)\times10^4$	$1{,}82\times10^4$

Порівняння експериментальних та розрахункових даних показує задовільне їх узгодження.

4.4 Моделювання захисту робочих зон від пилового забруднення шляхом зволоження поверхні штабеля

Відомо, що для зниження інтенсивності пилового забруднення повітря в робочих зонах використовують зволоження поверхні штабеля водою (рис. 4.26).

Рисунок 4.26 – Зволоження вугілля
(фото: http://www.evkalipt.com.ua/inzhiniring/pylepodavlenie-orosheniem/ugolnaja-pyl/)

Для оцінювання ефективності такого методу захисту робочих зон від пилового забруднення побудована чисельна модель. Побудова моделі базується на таких міркуваннях. Нехай на поверхню вугілля в штабелі, що має площину S_{coal}, просочився об'єм води W_{wat}, а відносна пористість вугілля P_{coal}. Тоді глибина зони промочування (далі – зона) буде дорівнювати

$$h_{wat} = \frac{W_{wat}}{S_{coal} P_{coal}}.$$

У разі потрапляння об'єму води W_{wat} всередину вугілля змінюється його відносна вологість, що розраховується як

$$W^n = \frac{M^n}{M_{coal}} \cdot 100\%,$$

де M_{coal} – маса вугілля в зоні зволоження;

M^n – маса води на цей момент часу, $M^n = M^n_{water} + m_0$ ($M^n_{water} = W^n \rho$, де ρ – густина води; m_0 – початкова маса води в зоні).

Відносна вологість у зоні буде зменшуватися внаслідок випарювання води. Це можна розрахувати за такою залежністю:

$$W^{n+1} = \frac{M^n - dm_0}{M_{coal}} 100\%,$$

де dm_0 – маса води, що випарувалася за час dt;

M^n_{water} – маса води на попередньому часовому шарі.

Для розрахунку маси води, що випаровується з часом, використовується така емпірична модель [78]:

$$Q_w = (5{,}83 + 4{,}1V) P_{\text{Н}} \sqrt{M}, \qquad (4.18)$$

де Q_w – кількість води, що випаровується, грам/м^2/год;

V – локальна швидкість повітря біля поверхні штабеля;

P_H – тиск насиченої пари;

M – молекулярна маса.

Внаслідок випарювання води та зміни вологості в зоні зменшується порогова швидкість V_t. Для розрахунку порогової швидкості використовується така емпірична модель [142]:

$$V_t = 4,97 + 0,268 \cdot W^{1,58}, \tag{4.19}$$

де W – відносна вологість.

Зміна величини порогової швидкості змінює інтенсивність емісії вугілля від поверхні штабелю, тобто цей процес залежить від часу. Для розрахунку інтенсивності емісії вугільного пилу використовується така емпірична залежність [121]:

$$Q = 4,2 \cdot (V - V_t), \tag{4.20}$$

де V – локальна швидкість повітря біля поверхні штабелю; V_t – швидкість відриву часток пилу, V_t=1,58 м/с.

Але локальна швидкість повітряного потоку є різною на різних ділянках штабеля. Таким чином, для визначення інтенсивності емісії вугільного пилу від поверхні штабеля потрібно знати локальну швидкість повітря біля кожної його ділянки. Тобто потрібно розв’язати аеродинамічну задачу. Слід зауважити, що поверхня штабелю має складну геометричну форму, яка впливає на формування локального поля швидкості. Для розв’язання цієї аеродинамічної задачі буде використовуватися система рівнянь Ейлера, що записані в змінних Гельмгольца [76, 109]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u\omega}{\partial x} + \frac{\partial v\omega}{\partial y} = 0, \tag{4.21}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \qquad (4.22)$$

$\omega = \partial v/\partial x - \partial u/\partial y$ – вихор;

ψ – функція струму;

$u = \partial\psi/\partial y, v = -\partial\psi/\partial x$ – компоненти вектора швидкості повітряного потоку.

Граничні умови для цих моделюючих рівнянь такі:

- верхня межа: ψ=const;
- тверда поверхня: ψ=const;
- на межі входу: відоме значення швидкості потоку u, значення функції току ψ та вихору ω: $\psi|_{\text{вхід}} = \psi(y)$, $\omega|_{\text{вхід}} = 0$;
- на межі виходу потоку реалізуються «м'які» граничні умови.

Для моменту часу t=0 реалізується умова: $\omega|_{t=0}$=0.

Процес поширення вугільного пилу від поверхні вантажу моделюється на базі рівняння масопереносу (3.12). Граничні та початкові умови для моделюючого рівняння масопереносу (3.12) розглянуто в п. 3.3.

Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь використовуються різницеві схеми, що розглянути в п. 3.3. Але для чисельного інтегрування (4.22) також використовується інша різницева схема [99]:

$$\frac{\psi_{i+1,j,k} - 2\psi_{i,j,k} + \psi_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{\psi_{i,j+1,k} - 2\psi_{i,j,k} + \psi_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} = -\omega_{ij}.$$

Після визначення функції току розраховуються компоненти вектора швидкості повітряного потоку:

$$u_{i,j} = \frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{\Delta y}, v_{i,j} = -\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{\Delta x}.$$

На базі розробленої чисельної моделі створено код COAL-22W, мова програмування – FORTRAN.

Переваги побудованої моделі полягають в тому, що під час виконання досліджень враховується:

1. Нерівномірне поле швидкості повітряного потоку.

2. Нерівномірний процес випарювання води з різних ділянок штабеля вугілля.

3. Геометрична форма штабеля вугілля.

4. Турбулентна дифузія повітряного потоку.

5. Зміна величини порогової швидкості з часом на різних ділянках штабеля.

Алгоритм розв’язання задачі з визначення рівня пилового забруднення робочих зон на базі розробленої моделі такий:

1. Здійснюється розрахунок поля потенціалу швидкості.

2. Визначається локальна швидкість повітряного потоку біля різних ділянок штабеля.

3. Визначається маса води dm_0 , що випаровується за проміжок часу dt.

4. Розраховується зміна відносної вологості вугілля в зоні зволоження.

5. Розраховується нове значення параметра V_t.

6. Визначається кількість вугілля, що емітована в повітря від ділянки штабеля за проміжок часу dt.

7. Розрахунок повторюється, починаючи з п. 3.

Вихідні дані для моделювання:

1. Дані щодо швидкості повітряного потоку.

2. Форма поверхні штабеля, розміри штабелю.

3. Кількість води, що подається на поверхню штабеля.

4. Початкова відносна вологість вугілля.

5. Щільність вугілля.

Нижче наведено результати розв’язання задачі з визначення ефективності використання зволоження штабеля вугілля. Моделювання здійснювалося за таких даних: розміри розрахункової області 32 м × 27 м; максимальна висота штабеля вугілля 7,7 м, довжина штабеля 14,3 м; швидкість повітряного потоку 12 м/с; початкова вологість вугілля 4 %; на поверхню вугілля потрапило 1 л/м^2 води; пористість вугілля 10 %; швидкість гравітаційного осадження пилу 0,001 м/с.

Далі на рисунках показано, як змінюється інтенсивність зони пилового забруднення біля штабеля з часом внаслідок випаровування води з поверхні вугільного штабеля.

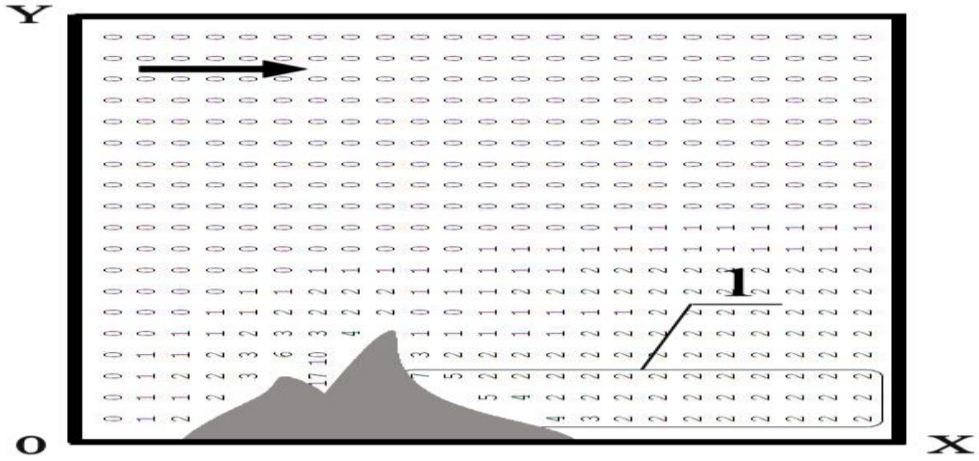


Рисунок 4.27 – Концентрація пилу біля штабеля вугілля, t=168 с, $C_{макс}$=3,21 мг/м^3:

1 – концентрація пилу в діапазоні 0,06 мг/м^3 – 0,16 мг/м^3.

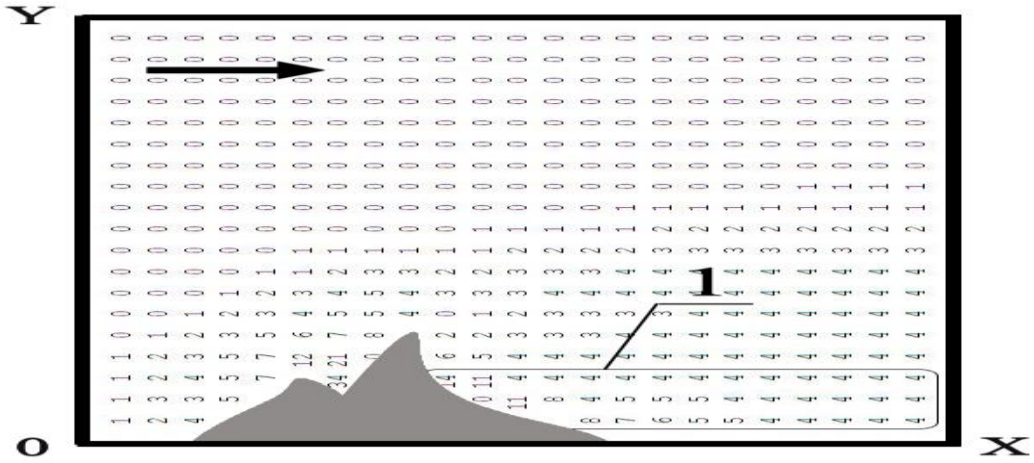


Рисунок 4.28 – Концентрація пилу біля штабеля вугілля, t=335 с, $C_{макс}$=6.47 мг/м^3:

1 – концентрація пилу в діапазоні 0.25 мг/м^3 – 0.71 мг/м^3.

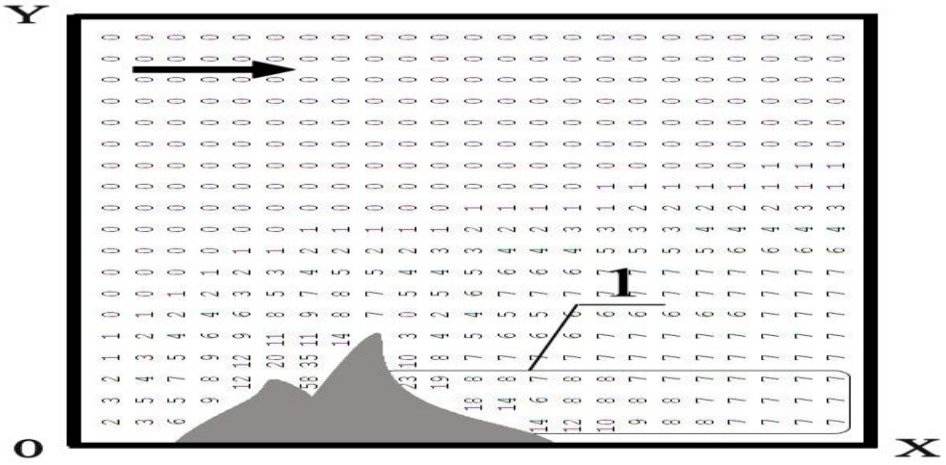


Рисунок 4.29 – Концентрація пилу біля штабеля вугілля, t=559 с, $C_{макс}$=1082 мг/м^3:

1 – концентрація пилу в діапазоні 0,75 мг/м^3 – 2,05мг/м^3.

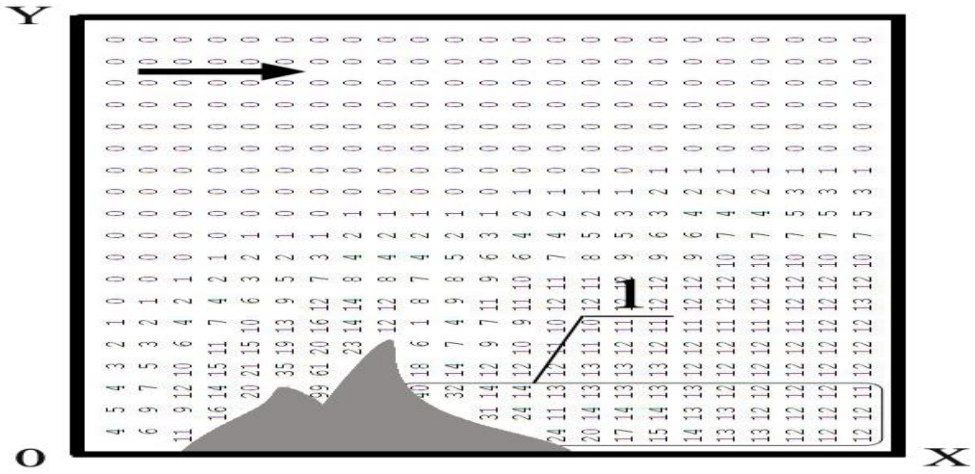


Рисунок 4.30 – Концентрація пилу біля штабеля вугілля, t=951 с, $C_{макс}$=18,31 мг/м^3:
1 – концентрація пилу в діапазоні 2,91 мг/м^3 – 5,85 мг/м^3.

Аналіз наведених рисунків показує, що приблизно протягом 10 хв після зволоження в робочій зоні за штабелем вугілля концентрація пилу в повітря мала. Але внаслідок випаровування води з поверхні штабеля збільшується інтенсивність виносу пилу від штабеля та, як результат цього, дуже швидко збільшується концентрація пилу в робочій зоні за штабелем. Так, протягом 13 хв (з часового рівня 168 с до часового рівня 951 с) концентрація пилу в робочій зоні збільшується більш ніж у 30 разів. Зауважимо, що для моменту часу близько 43 хв після зволоження поверхні вугілля середня концентрація пилу в робочій зони за штабелем уже буде майже 7,6 мг/м^3. Тобто на той час буде спостерігатися суттєве забруднення повітря в робочій зоні.

Таким чином, на базі побудованої чисельної моделі можна здійснювати оцінювання часового проміжку, коли ефективність використання зволоження поверхні штабелю зменшується та потрібно знову здійснювати зволоження. Час розрахунку становить15 с.

Надалі було розроблено чисельну модель для розв’язання такої задачі. Як моделюючі використовуються рівняння масопереносу та рівняння для потенціалу швидкості:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial (v-w)C}{\partial y}=div\cdot(\mu\cdot grad\cdot C)+\sum_{i=1}^{N}Q_i(t)\cdot\delta(x-x_i)\delta(y-y_i),$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}=0,$$

$$u=\frac{\partial P}{\partial x};v=\frac{\partial P}{\partial y}.$$

Пояснення для моделюючих рівнянь наведено вище.

Для чисельного розв'язання рівняння для потенціалу швидкості це рівняння приводиться до вигляду

$$\frac{\partial P}{\partial t}=\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$

де t – це фіктивний час.

Далі використовується така двокрокова схема розщеплення [27, 134]:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}-P_{i,j}^{n}}{\Delta t}=\left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}\right]+\left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}\right],$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1}-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t}=\left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1}-P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2}\right]+\left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1}-P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2}\right].$$

Розрахунок закінчується, коли виконується умова

$$\left|P_{ij}^{n+1}-P_{ij}^{n}\right|\le\varepsilon,$$

де ε – мале число;

n – номер ітерації.

Компоненти швидкості визначаються на сторонах різницевих комірок:

$$u_{i,j} = \frac{P_{ij} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Для чисельного інтегрування використовувалася різницева схеми, що розглянута вище.

На основі запропонованої чисельної моделі розроблено код COAL-P, мова програмування – FORTRAN.

Ця чисельна модель була використана для прогнозування забруднення повітряного пилу поблизу вугілля після його змочування. Вугільний штабель мав складну геометричну форму (рис. 4.31). Вугільна поверхня змочувалася водою в кількості 1 л/м^2. Початкова вологість вугілля становила 4 %; пористість вугілля становила 10 %; швидкість вітрового потоку становила 17 м/с, коефіцієнти турбулентної дифузії були μ_x=μ_y=4 м^2/с, w=0.001 м/с. Варто зауважити, що це був «пілотний» чисельний експеримент з метою вивчення «можливостей» розробленої чисельної моделі.

Далі на рисунках показано, як змінюється з часом інтенсивність зони пилового забруднення поблизу вугільного штабеля. Кожне число на рисунках показує відсоток концентрації пилу від максимальної концентрації пилу в розрахунковій області.

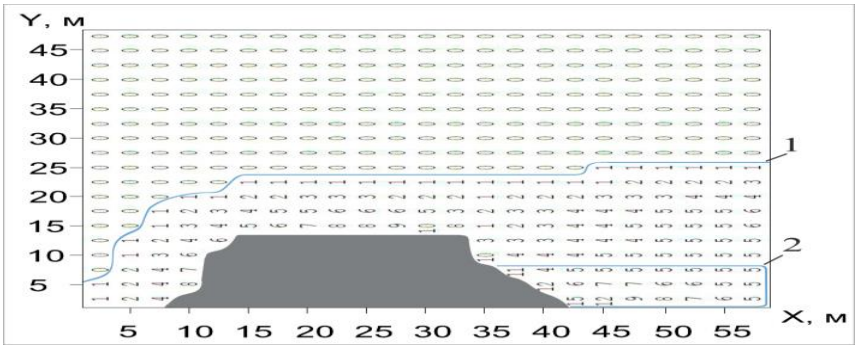


Рисунок 4.31 – Концентрація вугільного пилу біля штабеля вугілля, t=140 с: 1 – C=7,8 мг/м^3; 2 – концентрація пилу в межах 31,2–117,3 мг/м^3.

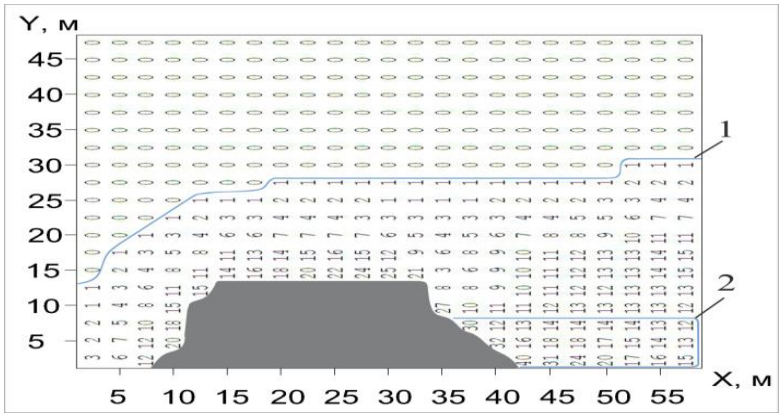


Рисунок 4.32 – Концентрація вугільного пилу біля штабеля вугілля, *t*=350 с:
1 – *C*=7,8 мг/м^3; 2 – концентрація пилу в межах 93,6–312,2 мг/м^3.

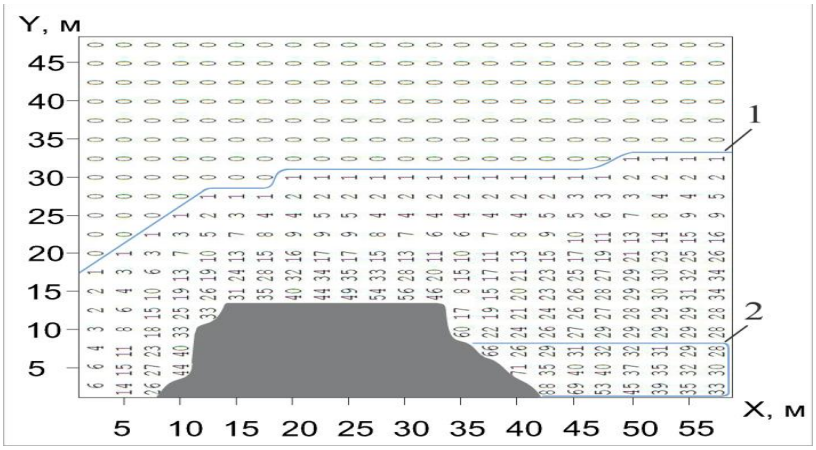


Рисунок 4.33 – Концентрація вугільного пилу біля штабеля вугілля, *t*=770 с:
1 – *C*=7,8 мг/м^3; 2 – концентрація пилу в межах 202,4–553,1 мг/м^3.

Аналіз наведених рисунків показує, що внаслідок інтенсивного випаровування води з поверхні штабеля інтенсивність емісії пилу з нього збільшується і, як результат, концентрація пилу в робочій зоні за вугільним штабелем збільшується дуже швидко. З часом верхня межа зони забруднення, яка позначена ізолінією *C*=7,8 мг/м^3, також змінює своє положення: рухається вгору від штабеля. Це означає, що зона забруднення з часом збільшується та необхідно повторити змочування штабеля.

Варто зауважити, що час обчислювання становив 5 с.

4.5 Зменшення рівня пилового забруднення робочих зон шляхом подавання води в пилову хмару

Іншим підходом до зменшення рівня пилового забруднення робочих зон є подавання води в саму пилову хмару [71, 73, 114], що формується в повітрі.

Для визначення ефективності такого засобу захисту робочих зон важливу роль у таких дослідженнях мають математичні моделі, оскільки виконувати натурні експерименти практично неможливо, виходячи з розмірів штабелів вугілля. Лабораторні експерименти потребують багато часу на їх постановку, проведення вимірів для значної кількості метеорологічних сценаріїв та обробку результатів. Дослідження на базі математичних моделей для визначення забруднення повітря біля штабелів вугілля дозволяє швидко визначити ефективність цього засобу зниження концентрації пилу в робочих зонах.

Під час теоретичного розв’язання задачі з оцінювання ефективності використання подавання води в пилову хмару для зниження рівня пилового забруднення повітря в робочих зонах виникають певні труднощі, а саме:

1. Потрібно враховувати складну геометричну форму штабеля, що впливає на формування поля швидкості повітряного потоку та, як наслідок, – на формування нерівномірного концентраційного поля пилу та крапель води в зоні дослідження.

2. Математичні труднощі «створення» геометричної форми штабеля в чисельній моделі, що пов’язано насамперед з постановою граничних умов на поверхні штабелю.

3. Потрібно математично коректно «описати» процес взаємодії краплі води в повітрі з частками пилу. При цьому враховувати, що краплі води та частки пилу постійно рухаються в повітрі.

Єдиним методом розв’язання задачі є використання CFD-моделювання. Проте при цьому виникає серйозна проблема апроксимації моделюючих

рівнянь в областях складної геометричної форми, складність апроксимації граничних умов, що загалом створює значні труднощі під час створення чисельної моделі та коду. Нижче розглядається побудова CFD-моделі, що має такі переваги:

1. Зручність побудови форми штабеля в дискретній моделі.

2. Швидкість зміни форми штабеля в дискретній моделі в разі виконання серійних розрахунків.

3. Швидкість розрахунку.

4. Можливість моделювання нерівномірного поля концентрації пилу біля штабеля.

5. Можливість моделювання поширення крапель води в області складної геометричної форми.

6. Можливість врахувати взаємодію краплі води та частки пилу в рухомому повітрі.

Модель орієнтована на розв’язання таких задач:

1. Визначення поля концентрації пилу в області дослідження, що характеризується складною внутрішньою геометрією (тобто, областей, що мають неканонічну форму).

2. Визначення концентрації пилу в області дослідження з урахуванням нерівномірного процесу емісії пилу від різних поверхонь штабеля.

3. Можливість виконання досліджень (моделювання) з визначення ефективності використання подавання води в пилову хмару з метою зменшення забруднення повітря в робочих зонах біля штабеля вугілля.

Розглянемо тепер математичну модель процесу переносу пилової хмари, що формується під час емісії пилу від поверхні штабеля вугілля. Для експрес-розв’язання задачі з оцінювання рівня забруднення робочих зон під час руху пилової хмари використовується рівняння масопереносу

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial uS}{\partial x}+\frac{\partial (v-w_s)S}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial S}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial S}{\partial y}\right)+ \\ +\sum_{k=1}^{N}Q_k\delta(x-x_k)\delta(y-y_k), \tag{4.23}$$

де S – концентрація пилу в повітрі, кількість часток/м^3,

u, v – проєкції вектора швидкості повітряного потоку на осі декартової системи координат;

w_s – швидкість гравітаційного осадження пилу;

t – час;

$\mu_{x,}\mu_y$ – коефіцієнти турбулентної дифузії;

w_s – швидкість гравітаційного осадження пилу;

$\delta(\text{x}-x_k)\delta(y-y_k)$ – дельта-функція Дірака;

$x_{k,}y_k$ – координати джерела емісії пилу.

Граничні умови для цього рівняння такі:

1. На межі входу повітряного потоку в розрахункову область $S=0$.

2. На межі виходу потоку з рахункової області $\left.\frac{\partial S}{\partial n}\right|_{\Gamma}=0.$

3. На твердих межах (верхня та нижня межі розрахункової області):

$$\frac{\partial S}{\partial n}=0,$$

де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні.

Профіль швидкості потоку на вході в розрахункову область розраховується так [50]:

$$u=u_1\frac{\lg y/y_0}{\lg y_1/y_0},$$

де u_1 – швидкість потоку вітру на одиничній висоті. У моделі приймається, що коефіцієнти турбулентної дифузії пропорційні локальному значенню швидкості потоку [49, 50, 77]:

$$\mu_x = k_0 \cdot u,\ \mu_y = k_0 \cdot v,$$

де $k_0 = 0{,}1$.

Для моменту часу $t = 0$ початкова умова записується як $S = 0$.

Для розрахунку нерівномірного поля швидкості повітряного потоку біля штабеля вугілля використовується модель потенціального руху. Моделююче рівняння має вигляд [76, 109]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \qquad (4.24)$$

$$u = \frac{\partial P}{\partial x},\ v = \frac{\partial P}{\partial y},$$

де P – потенціал швидкості.

Граничні умови для рівняння (4.24) [109]:

1. $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ на непроникних межах.
2. $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ на верхній поверхні.
3. $P = const$ – на межі «виходу» потоку.
4. $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$ – на межі, де потік потік входить в розрахункову область (V_n – відома швидкість повітряного потоку).

Розглянемо тепер математичну модель процесу знепилювання хмари шляхом подавання води. У цій роботі розглядається процес знепилювання

хмари за рахунок подачі води в зону забруднення від спеціальних установок. Процес розсіювання крапель води в повітрі моделюється таким рівнянням масопереносу [77]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial (v-w)C}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+ \\ +\sum_{i=1}^{N}Q_i(t)\delta(x-x_i)\delta(y-y_i), \tag{4.25}$$

де C – концентрація крапель води в повітрі, кількість крапель/м^3;

$Q_i(t)$ – інтенсивність подачі води;

u, v – проєкції вектора швидкості повітряного потоку на осі декартової системи координат;

w – швидкість гравітаційного осадження краплі;

t – час;

μ_x, μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії;

x_i, y_i – координати джерела емісії води;

$\delta(x-x_i), \delta(y-y_i)$ – дельта-функція Дірака (моделює місце подавання води).

Розглянемо нову модель, що дозволяє розрахувати процес взаємодії крапель води та часток пилу під час їх руху в повітряному потоці. Цей розрахунок здійснюється на базі таких міркувань. Так, якщо насос подає в пилову хмару об’єм води в кількості W, м^3/с, то інтенсивність подавання крапель води Q_i, крапель/с, розраховується так:

$$Q_i=\frac{W}{v},$$

де v – об’єм краплі води.

Між краплями води та частками пилу відбувається взаємодія. Для математичного опису цієї взаємодії розроблена така модель (рис. 4.34). Краплі води «захоплюють» частки пилу, й інтенсивність цього процесу може бути розрахована так [11, 114]:

$$Q = \frac{S\pi d^2 \omega \eta}{4}, \tag{4.26}$$

де Q – кількість часток пилу, що «захоплює» крапля води за 1 с,

d – діаметр краплі води,

ω – відносна швидкість,

η – емпіричний параметр $(\eta = 0.48)$, S – концентрація часток пилу.

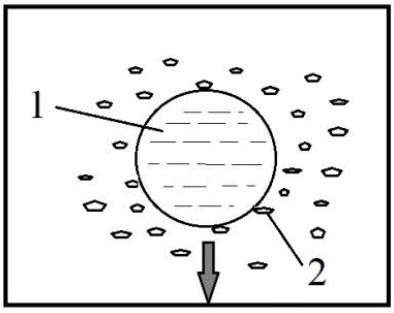


Рисунок 4.34 – Розрахункова схема:
1 – крапля води; 2 – частки пилу.

Залежність (4.26) зручна для практичного використання під час інженерних розрахунків. Але внаслідок руху повітряних мас концентрація часток пилу та крапель води буде різною для різних моментів часу в різних точках області дослідження. Також буде різною відносна швидкість ω. Подібні процеси залежність (4.26) не враховує. Тому будемо використовувати замість залежності (4.26) іншу залежність, а саме:

$$Q(x, y, t) = \frac{S(x, y, t)\pi d^2 \omega(x, y)\eta}{4}. \tag{4.27}$$

На відміну від залежності (4.26), запропонована залежність (4.27) враховує різне значення параметрів S, ω залежно від координат. Крім цього, враховується залежність параметра S від часу.

Слід також наголосити ще на дуже важливому аспекті: залежність (4.26) або (4.27) не вказує, коли процес «захоплення» часток пилу зупиниться. Тобто розрахунок на базі цих залежностей можна здійснювати у разі розв'язання задачі в «першому наближенні». Але для більш реального оцінювання ступеня взаємодії «крапля води + частки пилу», а значить – ступеня очищення повітря, потрібно визначити межу, коли така взаємодія може зупинитися.

Далі запропоновано залежність, що дозволяє здійснювати оцінювання максимальної маси пилу, що може бути «захоплена» краплею води без її руйнування. Для отримання цієї залежності будемо виходити з таких міркувань. Як відомо, надлишковий тиск всередині краплі розраховується за формулою Лапласа:

$$p_L = \frac{2\sigma}{R}, \tag{4.28}$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу,

R – радіус краплі.

За рахунок цього тиску на внутрішню поверхню краплі, що має площу S_k, діє сила

$$F_L = p_L \mathrm{S}_k . \tag{4.29}$$

З іншого боку, на зовнішню поверхню краплі діє сила тяжіння від часток пилу, що «захоплені» краплею. Якщо сумарна маса цих часток є m, то сила тяжіння така:

$$F_m = mg. \tag{4.30}$$

Тоді умова рівноваги має вигляд

$$F_L = F_m .$$

Або

$$\frac{2\sigma}{R} S_k = mg .$$

Звідси визначаємо, що максимальна маса пилу, що може бути утримана на поверхні краплі без її руйнування, розраховується за формулою:

$$m = \frac{2\sigma}{gR}. \tag{4.31}$$

Ця залежність буде далі використовуватися в моделюванні процесу знепилювання хмари за рахунок подачі води на базі побудованої чисельної моделі. Розрахунок на базі залежності (4.31) реалізовано в окремій підпрограмі, що входить до розробленого пакета програм.

Наголосимо, що для практики, коли потрібно виконувати значну кількість розрахунків та у ході їх виконання, початкові дані відомі дуже приблизно, отже, пропонується використовувати іншу залежність для визначення зменшення концентрації пилу в повітрі з часом, а саме:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -k_c C \cdot S , \tag{4.32}$$

де k_c – емпіричний параметр.

Визначення параметра k_c потребує виконання досить складних експериментальних досліджень. Але можна здійснити теоретичну оцінку значення цього параметра. Далі пропонується інженерний метод щодо теоретичного визначення величини параметра k_c. Для цього подамо залежність (4.32) у кінцево-різницевому вигляді

$$S^{n+1} = S^n - dt \cdot k_c C^n \cdot S^n,$$

де S^{n+1} – концентрація пилу на новому часовому кроці;

S^n –концентрація пилу на попередньому часовому кроці;

C^n – концентрація крапель води на попередньому часовому кроці.

З цього виразу визначимо значення коефіцієнта k_c:

$$k_c = \frac{S^n}{dt \cdot C^n \cdot S^n} - \frac{S^{n+1}}{dt \cdot C^n \cdot S^n},$$

або

$$k_c = \frac{1}{dt \cdot C^n} - \frac{S^{n+1}}{dt \cdot C^n \cdot S^n}. \qquad (4.33)$$

Можна припустити, що внаслідок «захоплення» часток пилу водою за час dt концентрація пилу стала дорівнювати нулю, тобто $S^{n+1} = 0$. Тоді маємо:

$$k_c = \frac{1}{dt \cdot C^n}. \qquad (4.34)$$

Таким чином, параметр k_c обернено пропорційний проміжку часу dt. Значення цього проміжку часу можна оцінити на базі таких міркувань. По-перше, з одного боку, якщо крапля води падає з гравітаційною швидкістю w з деякої висоти, то цей проміжок часу не може бути більшим ніж

$$dt = \frac{h}{w}. \tag{4.35}$$

де h – початкова висота положення краплі.

З іншого боку, якщо крапля води може максимально «захопити» масу пилу m (ця маса розраховується на базі (4.31)) та якщо маса однієї частинки пилу є m_p, то крапля води може «захопити» таку кількість часток пилу:

$$n = \frac{m}{m_p}.$$

Якщо прийняти до уваги залежність (4.26), то проміжок часу, коли буде «захоплена» ця максимальна маса, визначається так:

$$dt = \frac{n}{Q}. \tag{4.36}$$

Таким чином, для визначення коефіцієнта k_c (залежність (4.34)) використовуються вирази (4.35) та (4.36). Слід наголосити, що цей інженерний метод запропоновано для виконання «пілотних» розрахунків за відсутності на час проведення розрахунків необхідних експериментальних даних.

Розглянемо питання чисельного розв’язку моделюючих рівнянь масопереносу пилу та крапель води. По-перше, для чисельного інтегрування

моделюючих рівнянь будемо використовувати кінцево-різницеві методи. Розрахунок здійснюється на прямокутній сітці.

Для розв'язання рівняння для потенціалу швидкості запишемо його так:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \tag{4.37}$$

де t – фіктивний час.

Далі для рівняння (4.37) здійснимо геометричне розщеплення [100]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \tag{4.38}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \tag{4.39}$$

Розрахункові залежності для визначення невідомого значення P на базі рівняння (4.38) мають вигляд [99]:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \triangle t \frac{P_{i+1,j}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \triangle t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2}.$$

Розрахункові залежності для визначення невідомого значення P на базі рівняння (4.39) мають вигляд [99]:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \triangle t \frac{P_{i,j+1}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta y^2} + \triangle t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}.$$

Оскільки ми розв'язуємо еволюційне рівняння, то розрахунок за цими залежностями закінчується, коли виконується умова

$$\left|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n}\right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число;

n – номер ітерації.

Швидкість потоку розраховується на межах різницевої комірки:

$$u = \frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{\Delta x}, \quad v = \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j}}{\Delta y}.$$

Для чисельного розв'язання рівняння масопереносу пилу здійснимо його розщеплення за фізичними процесами таким чином:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x}\right), \tag{4.40}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y}\right), \tag{4.41}$$

де v=v-w.

Для чисельного інтегрування (4.40) застосовується така двокрокова схема розщеплення:

– на першому кроці використовується залежність [109]

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^{n} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^{+} S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^{+} S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n} + S_{i+1,j}^{n}}{2\Delta x^2},$$

– на другому кроці використовується залежність [109]

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^{-} S_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^{-} S_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

де $u^{+}=\frac{u+|u|}{2}$, $u^{-}=\frac{u-|u|}{2}$.

Для чисельного роз'язання рівняння (4.41) використовується така двокрокова схема розщеплення:

– на першому кроці використовується залежність [109]

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}=S_{i,j}^{n}-\Delta t\frac{v_{i,j+1}^{+}S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}-v_{i,j}^{+}S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y}+\Delta t\mu_{y}\frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^{2}}+\Delta t\mu_{y}\frac{-S_{i,j}^{n}+S_{i,j+1}^{n}}{2\Delta y^{2}},$$

– на другому кроці використовується залежність [109]

$$S_{i,j}^{n+1}=S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}-\Delta t\frac{v_{i,j+1}^{-}S_{i,j+1}^{n+1}-v_{i,j}^{-}S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y}+\Delta t\mu_{y}\frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^{2}}+\Delta t\mu_{x}\frac{-S_{i,j}^{n+1}+S_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^{2}},$$

де $v^{+}=\frac{v+|v|}{2}$, $v^{-}=\frac{v-|v|}{2}$.

Для визначення зміни концентрації пилу внаслідок емісії з поверхні штабеля використовується метод Ейлера [100]. Розрахункова залежність має вигляд

$$S_{i,j}^{n+1}=S_{i,j}^{n}+\Delta t\sum_{k=1}^{N}Q_{k}\delta(x-x_{k})\delta(y-y_{k}).$$

Аналогічно здійснюється чисельне інтегрування рівняння для переносу крапель води.

На базі розглянутої чисельної моделі створено комп'ютерний код Pile-*2P*. Для створення комп'ютерного коду використовувалася мова програмування FORTRAN.

Побудована чисельна модель була використана для розв’язання такої модельної задачі. Є штабель вугілля, що має складну геометричну форму (рис. 4.35). На першому етапі розрахунків прогнозується рівень пилового забруднення повітря за штабелем за відомих метеорологічних даних. На другому етапі прогнозується інтенсивність забруднення повітря в разі подавання води в хмару, що формується біля штабеля.

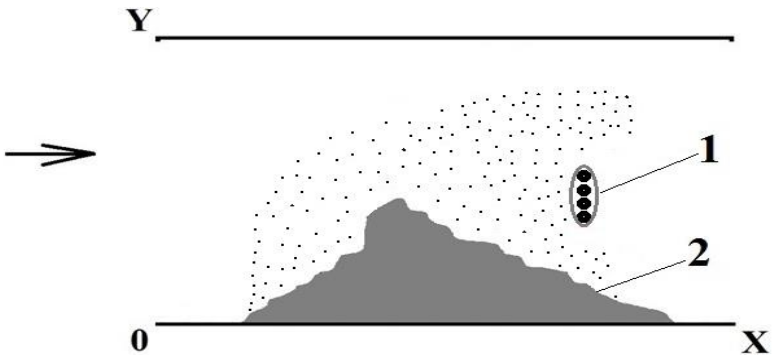


Рисунок 4.35 – Схема розрахункової області:
1 – зона розпилу води; 2 – штабель вугілля.

У ході розрахунків приймалося: розміри розрахункової області 80 м × 37 м; швидкість повітряного потоку 4 м/с на висоті 10 м; подавання води здійснюється на висоті 12,8 м та на довжині 54,4 м; об’єм води – 40 л/с; діаметр краплі води 0,001 м; швидкість гравітаційного осадження краплі 0,001 м/с; діаметр частки пилу 40 мкм; густина пилу 1500 кг/м^3; швидкість осадження часток пилу 0,0001 м/с. Довжина штабеля 48 м, максимальна висота штабеля 10,3 м. Інтенсивність виносу пилу від ділянки штабеля вугілля розраховувалася на базі емпіричної залежності [8]. Ця залежність враховує різне значення інтенсивність емісії пилу від ділянки штабеля залежновід значення локальної швидкості повітря біля ділянки. Локальна швидкість повітря розраховується шляхом розв’язання задачі аеродинаміки (4.24).

Далі на рисунках показано область забруднення біля штабеля вугілля за відсутності подавання води та при подаванні води. Кожне число на рисунках

вказує концентрацію пилу у відсотках від максимальної концентрації в розрахунковій області C_{max}.

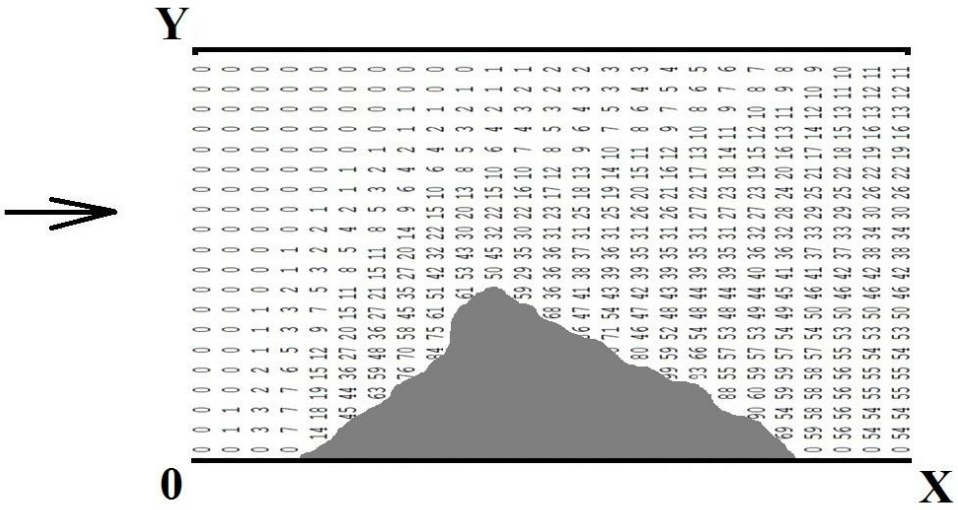


Рисунок. 4.36 – Зона пилового забруднення (немає подачі води), C_{max}=19,8 мг/м^3

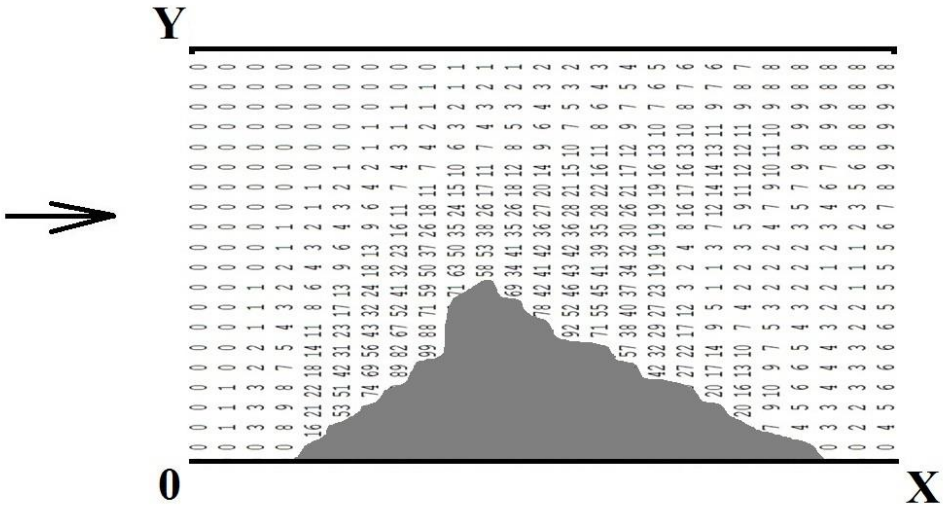


Рисунок 4.37 – Зона пилового забруднення (є подача води), C_{max}=16,9 мг/м^3

Як можна бачити з наведених рисунків, подавання води зменшує концентрацію пилу в повітрі за штабелем. Також можна бачити зону «впливу» водяного струменя, де суттєво знижується концентрація пилу в

повітрі. Концентрація пилу в цій зоні перебуває в діапазоні 1% – 6% від максимальної концентрації пилу в розрахунковій області.

На рис. 4.38 наведено значення концентрації пилу в робочій зоні за штабелем на висоті 1,7 м (положення органів дихання людини).

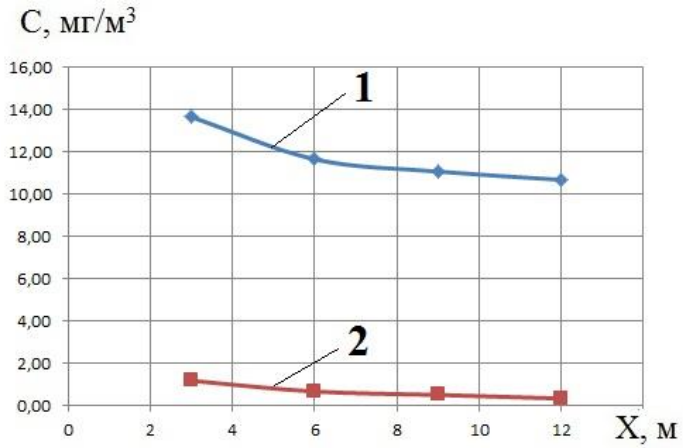


Рисунок 4.38 – Значення концентрації пилу в робочій зоні:
1 – немає подачі води; 2 – є подача води.

Як можна бачити з рис. 4.38, подача води дозволила зменшити концентрацію вугільного пилу не тільки в повітрі над штабелем, але й у робочій зоні за штабелем. Якщо прийняти, що ГДК для пилу дорівнює 6 мг/м^3, то за відсутності подачі води це значення ГДК порушується у всій робочій зони. При подачі води значення ГДК не порушується.

Зауважимо, що час розрахунку задачі становив 4 с.

Висновки до розділу 4

1. На основі виконаних експериментів підтверджена робоча гіпотеза про можливість зменшення забруднення повітря в робочих зонах біля штабеля вугілля шляхом використання екрана з додатковим елементом.

2. На основі експериментальних досліджень виявлено закономірності формування зон пилового забруднення біля штабеля вугілля та в разі використання захисних екранів.

3. Для оцінювання рівня забруднення повітря в робочих зонах від штабелю вугілля з екраном, який має додатковий елемент, створена комп'ютерна модель, що дозволяє розв'язувати задачу з урахуванням швидкості повітря, геометричної форми штабеля, дифузії, нерівномірної швидкості емісії пилу від різних ділянок штабеля.

4. Для оцінювання рівня забруднення робочих зон від декількох штабелів вугілля створена тривимірна комп'ютерна модель, що дозволяє розв'язувати задачу з урахуванням швидкості повітря, геометричної форми штабелів, дифузії, нерівномірної швидкості емісії пилу від різних ділянок штабеля.

5. Створені комп'ютерні моделі дають можливість виконувати дослідження із забруднення повітря в робочих зонах біля штабелів вугілля в режимі реального часу. Ці комп'ютерні моделі є ефективним інструментом параметричного аналізу рівня пилового забруднення робочих зон та оцінювання ефективності використання захисних екранів.

6. Створено чисельну модель, що дозволяє оцінювати ефективність використання зволоження поверхні штабеля з метою зменшення рівня пилоутворення. Результати виконаного обчислювального експерименту показують, що модель дозволяє швидко оцінити ефективність зволоження з урахуванням комплексу важливих фізичних факторів, що впливають на інтенсивність забруднення робочих зон.

7. Розроблені комп'ютерні моделі надають досліднику вільний вибір з аналізу ефективності конструкторських рішень із захисту робочих зон, що розташовані біля штабелів вугілля, від пилового забруднення.

8. Розроблено метод оцінювання ефективності використання подавання води в пилову хмару, що утворилася біля штабеля вугілля. Результати обчислювального експерименту показують, що розроблений метод дозволяє

швидко оцінювати ефективність знепилювання хмари шляхом подавання води.

РОЗДІЛ 5
ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ХІМІЧНОГО ТА ТЕРМІЧНОГО УРАЖЕННЯ ПРАЦІВНИКІВ ПІД ЧАС ПІДВОДНИХ РОБІТ

У розділі розглядається побудова експрес-моделей для оцінювання ризику термічного та хімічного ураження водолазів під час виконання підводних робіт, що пов’язані з ліквідацією течі в пошкоджених підводних трубопроводах. Основні результати цього розділу наведено в працях [30, 31, 35, 37, 43, 44].

5.1 Оцінювання ризику ураження водолаза, що працює в зоні теплового або хімічного забруднення річки

У галузі охорони праці існує клас задач, що сьогодні залишилися практично поза увагою. Одна з них – оцінювання ризику ураження водолаза, що працює в зоні теплового або хімічного забруднення річки. Такий ризик виникає тому, що на дні багатьох річок розташовані трубопроводи, що транспортують небезпечні, агресивні рідини (наприклад, кислоту тощо). Слід також наголосити, що на дні водойм розташовані трубопроводи, які транспортують нагріту воду з ТЕС до споживачів, як, наприклад, підводне транспортування води з Придніпровської ТЕС в мікрорайони на правому березі міста Дніпро.

У випадку аварійного пошкодження підводного трубопроводу (наприклад, під впливом донної течії, пошкодження якорем тощо) спостерігається витікання небезпечних речовин та утворюється зона дуже інтенсивного забруднення акваторії. Для ліквідації течі в підводних трубопроводах задіюють водолазів. Для виконання таких підводних робіт потрібно заздалегідь знати зони інтенсивного хімічного забруднення

акваторії, щоб уникнути негативного впливу на водолаза та запобігти ризику ураження. Крім цього, у річку можливе аварійне потрапляння дуже нагрітих промислових вод, що створює загрозу термічного ураження водолаза, оскільки відомо, що при температурі води +40 ^{0}С водолаз може працювати не більш як 20 хв.

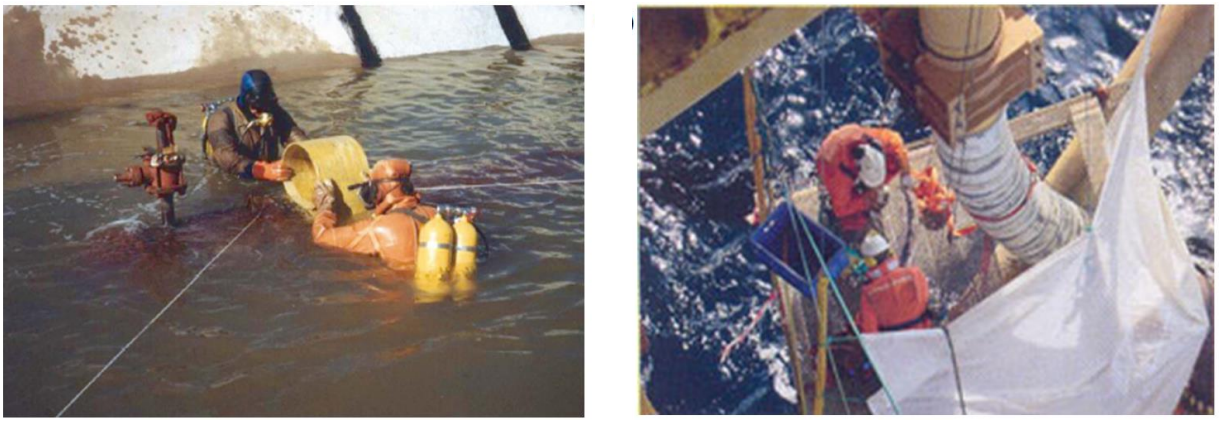


Рисунок 5.1 – Робота водолазів [62]

Найчастіше підводні трубопроводи розташовуються в траншеях на дні водойми (рис. 5.2). Для будівництва траншей використовують екскаватори, гідромонітори, землесоси та іншу техніку.

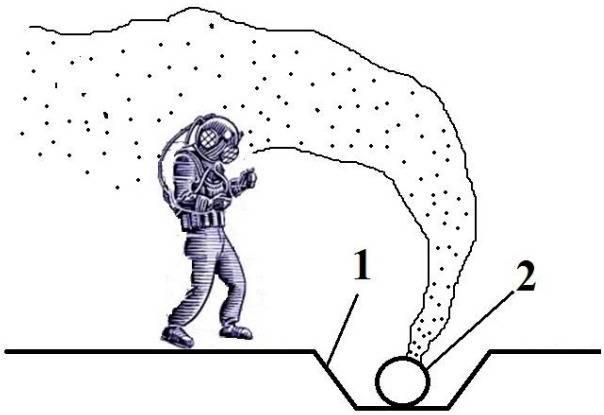


Рисунок 5.2 – Схема траншеї для підводного трубопроводу:
1 – траншея; 2 – місце аварійного витікання.

Розглянемо побудову математичної моделі для оцінювання ризику хімічного ураження водолаза в разі прориву підводного трубопроводу, що транспортує хімічно небезпечну рідину.

Розв'язання цієї задачі базується на визначенні полів хімічного забруднення акваторії шляхом розв'язування рівняння масопереносу (5.1) з урахуванням початкових умов, що наведені в розділі 2 [37]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}=div\left(\mu grad\, C\right)+Q\left(t\right)\delta\left(x-x_i\right)\left(y-y_i\right) \qquad (5.1)$$

де C – концентрація домішки;

u,v – складові вектора руху водного потоку; t – час; $\mu=\left(\mu_x,\mu_y\right)$ – коефіцієнти дифузії; x_i, y_i – декартові координати.

Після визначення полів концентрації небезпечної речовини у водоймі встановлюють зони можливого ризику водолаза – зони, де концентрація, наприклад, кислоти, перевищує допустиму величину та може пошкодити обладнання водолаза.

Якщо відбулося аварійне скидання у водойму нагрітих вод, то для визначення поля температури у водоймі використовується рівняння Бусінеска (рівняння енергії) [37, 44]

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial vT}{\partial y}=div\left(a\, grad\, T\right), \qquad (5.2)$$

де T – температура;

u,v – складові вектора руху водного потоку;

t – час;

$a=\left(a_x,a_y\right)$ – коефіцієнти температуропровідності;

x_i, y_i – декартові координати.

Значення коефіцієнтів температуропровідності можна прийняти на підставі таких міркувань: оскільки в турбулентному потоці число Прандтля дорівнює 1, то ми маємо, що $\mu = a$. Тобто коефіцієнт температуропровідності a дорівнює коефіцієнту турбулентної дифузії μ. Для «пілотних» розрахунків для турбулентного потоку можна прийняти, що $\mu \approx kV$, k – параметр, максимальне значення якого не перевищує 1. Тоді в розрахунках приймаємо $a_x \approx ku$, $a_y \approx kv$, $k = 0.1$.

Крайові умови для рівняння енергії: на вході в розрахункову область задається фонова температура води в акваторії; на виході з розрахункової області – температура в останній різницевій комірці дорівнює температурі в попередній різницевій комірці. На твердих межах (дно, верхня межа розрахункової області) ставиться умова $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$, де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні. Початкова умова: у розрахунковій області температура води дорівнює фоновій температурі.

Для моделювання поля швидкості водного потоку в акваторії з урахуванням його деформації внаслідок взаємодії з підводною траншеєю використовується рівняння Ейлера, що записано в змінних «вихор – функція току» (змінні Гельмгольца) [76, 109]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u\omega}{\partial x} + \frac{\partial v\omega}{\partial y} = 0, \tag{5.3}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = u; \frac{\partial \psi}{\partial x} = -v, \tag{5.4}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \tag{5.5}$$

де ω – вихор;

ψ – функція току;

$\overline{V}(u,v)$ – швидкість водного потоку.

Для цих моделюючих рівнянь використовуються граничні умови [109]:

1. Тверда поверхня ψ=const.

2. Верхня межа ψ=const.

3. На вхідній межі вихору $\psi\big|_{\text{вхід}} = \psi(y)$, $\omega\big|_{\text{вхід}} = 0$.

4. На твердій межі $\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$.

5. На межі виходу потоку – м'яка умова [109].

Початкова умова: $\omega\big|_{t=0} = 0$ для $t=0$.

Для чисельного інтегрування рівняння для переносу вихору використовується така схема розщеплення (локально-одновимірна) [100]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u\omega}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial v\omega}{\partial y} = 0.$$

Для чисельного інтегрування першого рівняння із цієї системи використовуються два різницевих рівняння розщеплення [37]:

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1/2} - \omega_{i,j}^{n}}{\Delta t} + \frac{u_{i+1,j}^{+}\omega_{i,j}^{n+1/2} - u_{i,j}^{+}\omega_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x} = 0,$$

$$\frac{\omega_{ij}^{n+1} - \omega_{ij}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \frac{u_{i+1,j}^{-}\omega_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^{-}\omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = 0.$$

Невідоме значення вихору визначається із цих залежностей так:

$$\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \omega_{i,j}^{n} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^{+}\omega_{i,j}^{n+1/2} - u_{i,j}^{+}\omega_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x},$$

$$\omega_{ij}^{n+1} = \omega_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^{-}\omega_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^{-}\omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta x}.$$

Для чисельного інтегрування другого рівняння із цієї системи використовується така апроксимація (схема розщеплення):

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1/2} - \omega_{i,j}^{n}}{\Delta t} + \frac{v_{i,j+1}^{+}\omega^{n+\frac{1}{2}}{}_{i,j} - v_{i,j-1}^{+}\omega^{n+\frac{1}{2}}{}_{i,j-1}}{\Delta y} = 0,$$

$$\frac{\omega_{ij}^{n+1} - \omega_{ij}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \frac{v_{i,j+1}^{-}\omega_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j-1}^{-}\omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = 0.$$

Невідоме значення вихору визначається із цих залежностей так:

$$\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \omega_{i,j}^{n} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^{+}\omega^{n+\frac{1}{2}}{}_{i,j} - v_{i,j-1}^{+}\omega^{n+\frac{1}{2}}{}_{i,j-1}}{\Delta y},$$

$$\omega_{ij}^{n+1} = \omega_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^{-}\omega_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j-1}^{-}\omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta y}.$$

Таким чином, невідомий параметр ω_{ij} на кожному верхньому часовому кроці розраховується на базі явної формули.

Значення вихору в кутовій точці розраховується за методикою, що наведена в [109].

Для розв’язання рівняння (5.5) запишемо його в такому вигляді [109]:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \omega, \qquad (5.6)$$

де t – фіктивний час.

Далі використовується така різницева схема розщеплення [109]:

$$\frac{\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \psi_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \left[\frac{-\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \psi_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \psi_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{\psi_{i+1,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{\psi_{i,j+1}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Далі значення функції току розраховують у такій послідовності [109]:

$$\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{4}} = \psi_{i,j}^{n} + \Delta t \omega_{i,j}^{k} / 2,$$

$$\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \psi_{i,j}^{n+\frac{1}{4}} + \Delta t \left[\frac{-\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \psi_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \Delta t \left[\frac{-\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \psi_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}} = \psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Delta t \left[\frac{\psi_{i+1,j}^{n+\frac{3}{4}} - \psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}}}{\Delta x^2} \right] + \Delta t \left[\frac{\psi_{i,j+1}^{n+\frac{3}{4}} - \psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\psi_{i,j}^{n+1} = \psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}} + \Delta t \omega_{i,j}^{k} / 2$$

де $\omega_{i,j}^{k} = 0.25 \cdot (\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j} + \omega_{i,j-1} + \omega_{i-1,j-1})$.

Тобто розрахунок невідомого значення параметра ψ_{ij} здійснюється за явною формулою.

Розрахунок ψ_{ij} припиняється, коли:

$$\left|\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n}\right| \le \varepsilon ,$$

де ε – мале число ($\varepsilon = 0.001$);

n – номер ітерації.

Компоненти вектора швидкості потоку розраховуються так:

$$u_{i,j} = \frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{\Delta y}$$

$$v_{i,j} = -\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{\Delta x} \qquad (5.7)$$

Алгоритм розв’язання системи рівнянь (5.3)–(5.5) такий:

1. Розраховується інтенсивність вихорів у кутових точках (межа підводної траншеї) за методикою [109].

2. Розв’язується рівняння переносу вихору.

3. Розв’язується рівняння для функції току.

4. Визначаються компоненти вектора швидкості потоку.

5. Розв’язується рівняння масопереносу (5.1) або (5.2), якщо розглядається теплове забруднення.

Для чисельного інтегрування рівняння енергії здійснюється таке його попереднє розщеплення:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(a_x\frac{\partial T}{\partial x}\right),$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial \nu T}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial y}\left(a_y\frac{\partial T}{\partial y}\right).$$

Далі використовується така схема розщеплення для першого рівняння [109]:

- крок 1:

$$\frac{T_{i,j}^{k}-T_{i,j}^{n}}{\Delta t}+L^{+}{}_{x}T^{k}=M_{xx}^{+}T^{k}+M_{xx}^{-}T^{n}, \qquad (5.8)$$

- крок 2:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1}-T_{i,j}^{k}}{\Delta t}+L^{-}{}_{x}T^{n+1}=M_{xx}^{+}T^{n}+M_{xx}^{-}T^{n+1}. \qquad (5.9)$$

Кінцево-різницева схема для другого рівняння записується так:

- крок 1, *k=n=1/2*:

$$\frac{T_{i,j}^{k}-T_{i,j}^{n}}{\Delta t}+L^{+}{}_{y}T^{k}=M_{yy}^{+}T^{k}+M_{yy}^{-}T^{n}, \qquad (5.10)$$

- крок 2:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1}-T_{i,j}^{k}}{\Delta t}+L^{-}{}_{y}T^{n+1}=M_{yy}^{+}T^{n}+M_{yy}^{-}T^{n+1}.$$

Опис різницевих операторів $L^{+}_{x,}L^{-}_{y},M^{+}_{xx}$... наведено в другому розділі.

На кожному кроці розщеплення невідоме значення температури визначається за явною формулою. Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу (5.1) використовується схема розщеплення, що наведена в п. 2.5.

Здійснена програмна реалізація побудованої чисельної моделі для аналізу формування областей хімічного та теплового забруднення в акваторії біля пошкодженого трубопроводу.

Створено код DIVE2, мова програмування – FORTRAN. До складу коду входять:

– Da02.DAT – файл початкових даних;

– DaW2 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку поля вихору в області дослідження;

– Da22 – підпрограма типу SUBROUTINE для визначення значення функції току в області дослідження;

– DaW22 – підпрограма типу SUBROUTINE для визначення значення поля швидкості водного потоку в області дослідження;

– Da2K – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку рівняння конвективного теплопереносу;

– D2W3 – підпрограма SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні рівняння конвективного переносу тепла;

– D1aK – підпрограма типу SUBROUTINE для розв’язання рівняння масопереносу в потоці води;

– Dh3K – підпрограма SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні рівняння масопереносу;

– DkW35 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля температури в області дослідження.

Вихідні дані для моделювання:

1. Дані щодо розташування підводних трубопроводів.

2. Геометрична форма ложементів (виїмки).

3. Розміри розрахункової області.

4. Розміри різницевої сітки.

5. Швидкість водного потоку.

6. Місце витікання хімічно небезпечної речовини з пошкодженого підводного трубопроводу, інтенсивність витоку.

7. Температура суміші на місці витікання нагрітої води з пошкодженого підводного трубопроводу.

8. Кількість розрахункових кроків за часом.

9. Розрахунковий крок за часом.

10. Коефіцієнти температуропровідності.

11. Параметр ε.

Нижче розглядається розв'язання модельної задачі на базі побудованої чисельної моделі. Розглядається пошкодження підводного трубопроводу, внаслідок чого в акваторію почала надходити нагріта вода. Моделювання здійснювалося за таких даних: розміри розрахункової області 5 м × 4 м; швидкість потоку 0,4 м/с; $k = 0.1$; температура води на виході з пошкодженого трубопроводу 85 ^{0}C. Нижче на рисунках показано, як змінюється інтенсивність зони теплового забруднення біля місця аварії.

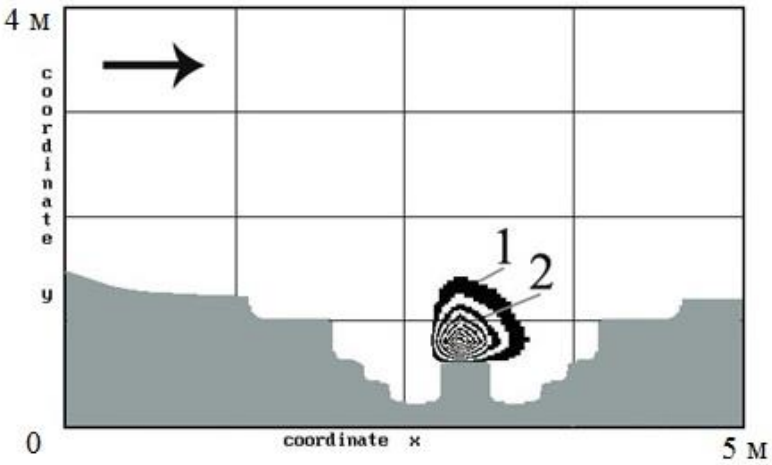


Рисунок 5.3 – Зона теплового забруднення в підводній траншеї, t=1,2 с:
1 – T=73 ^{0}C; 2 – T=79 ^{0}C.

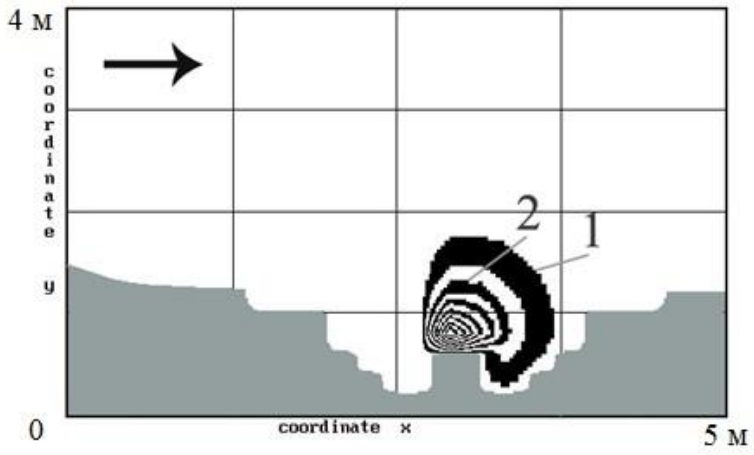


Рисунок 5.4 – Зона теплового забруднення в підводній траншеї, *t*=3,5 с: 1 – *T*=62 ^{0}C; 2 – *T*=78 ^{0}C.

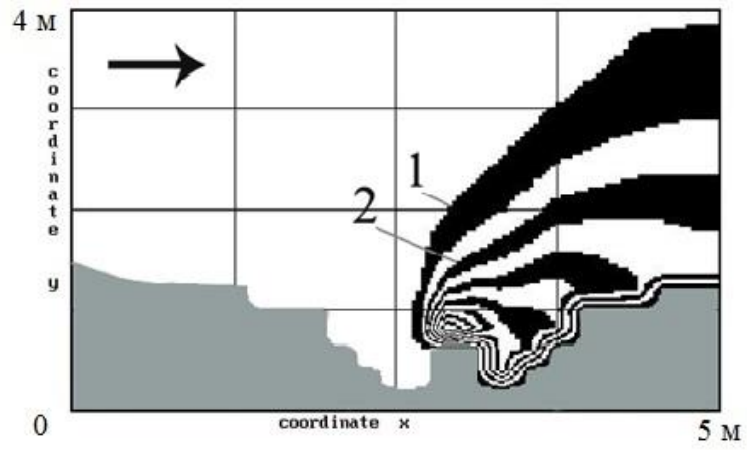


Рисунок 5.5 – Зона теплового забруднення біля підводної траншеї, *t*=10,2 с: 1 – *T*=56 ^{0}C; 2 – *T*=71 ^{0}C.

Аналізуючи дані, що наведені на рисунках, можна бачити, що дуже швидко біля пошкодженого трубопроводу формується зона підвищеної температури. Зона теплового забруднення, де температура приблизно 50 ^{0}C, доходить майже до вільної поверхні акваторії. Таким чином, занурення в зоні підвищеної температури може призвести до травмування працівника.

Далі наведено результати розв’язання другої задачі – розрахунок зони хімічного забруднення річки в разі пошкодження підводного трубопроводу

та витоку кислоти H_2SO_4. У підводній траншеї розташовано два трубопроводи, у першому є отвір, крізь який у воду потрапляє кислота (рис. 5.6).

Моделювання здійснювалося за таких даних: розміри розрахункової області 5.35 м × 5.35 м; швидкість потоку 0.1 м/с; $k = 0.1$; концентрація кислоти на витоку з трубопроводу – 100 % (густина 1831 г/л).

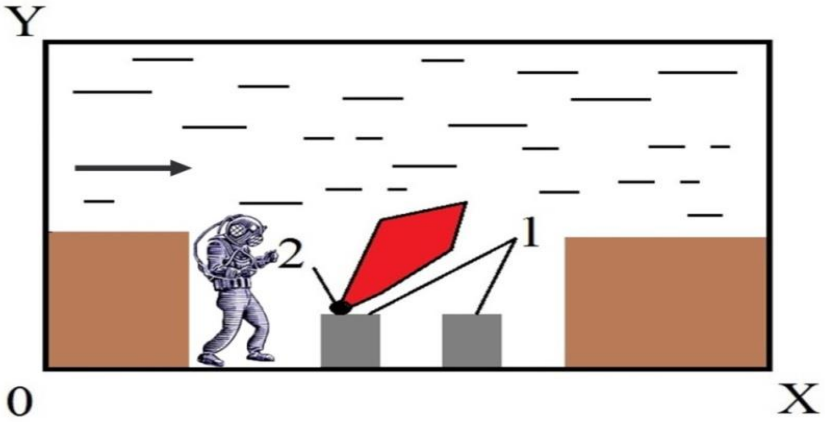


Рисунок 5.6 – Схема розрахункової області (аварійне витікання хімічно небезпечної речовини з підводного трубопроводу):
1 – ложементи для трубопроводів; 2 – місце аварійного витікання.

Нижче показано зону хімічного забруднення акваторії для моменту часу 100 с після розгерметизації підводного трубопроводу.

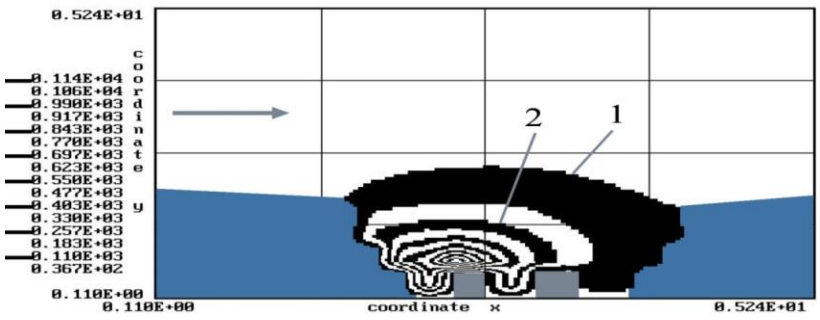


Рисунок 5.7 – Зона хімічного забруднення в підводній траншеї, t=100 с:
1 – C=3,67 %; 2 – C =18,3 %.

Аналізуючи рис. 5.7, можна зробити висновок, що в підводній траншеї дуже швидко формується зона інтенсивного хімічного забруднення води. Ця зона має складну форму, на яку впливають як бокові стінки траншеї, так і ложементи для труб. Можна бачити, що зона хімічного забруднення також формується між ложементами.

У табл.5.1 наведено концентрацію кислоти на різній відстані від місця витікання.

Таблиця 5.1 – Концентрація кислоти на різній відстані від місця витікання

Відстань, м	Концентрація кислоти,%
0,01	98
0,2	53
0,4	32
0,6	20
0,8	13

Аналізуючи дані табл. 5.1, можна бачити, що в зоні біля місця витікання концентрація кислоти буде найбільшою, тобто там, де буде працювати водолаз.

Побудована чисельна модель була також використана для розв’язання іншої модельної задачі. Розглядається пошкодження підводного трубопроводу (перший сценарій) або двох (другий сценарій), внаслідок чого в акваторію почала надходити хімічно небезпечна речовина (сірчана кислота). Моделювання здійснювалося за таких даних (рис. 5.8): довжина розрахункової області 5,35 м, глибина водойми 4,35 м; $k = 0.1$; швидкість потоку 0,1 м/с; концентрація кислоти в акваторії до аварії С=0. На місці витоку з пошкодженого підводного трубопроводу вважається, що концентрація домішки C=100 %. Трубопроводи розташовані на ложементах, що встановлені на дні водойми. Тобто в цій задачі ми маємо іншу

розрахункову область – наявність «перешкод» на шляху руху водного потоку.

Нижче на рисунках показано зону хімічного забруднення акваторії в разі аварійного витоку кислоти з пошкоджених підводних трубопроводів.

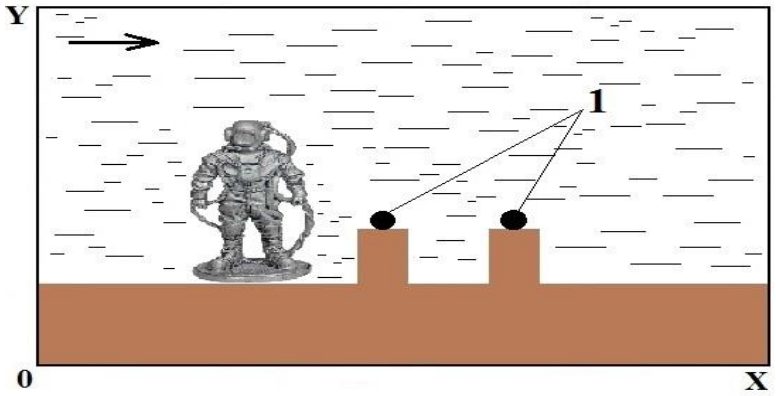


Рисунок 5.8 – Схема розрахункової області:
1 – підводні трубопроводи.

На рисунках значення концентрації кислоти наведено у відсотках від максимального значення, що спостерігається біля отвору в пошкодженому трубопроводі. Зона забруднення акваторії наведена для певного часу після початку витоку домішки.

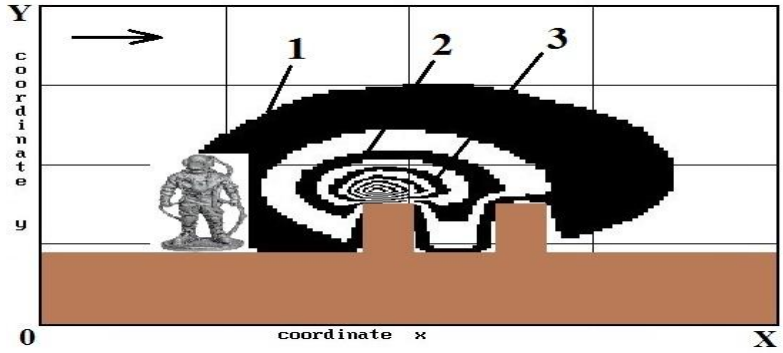


Рисунок 5.9 – Зона хімічного забруднення акваторії, t=17,1 с (перший сценарій):
1 – C=4 %; 2 – C=25 %; 3 – C=40 %.

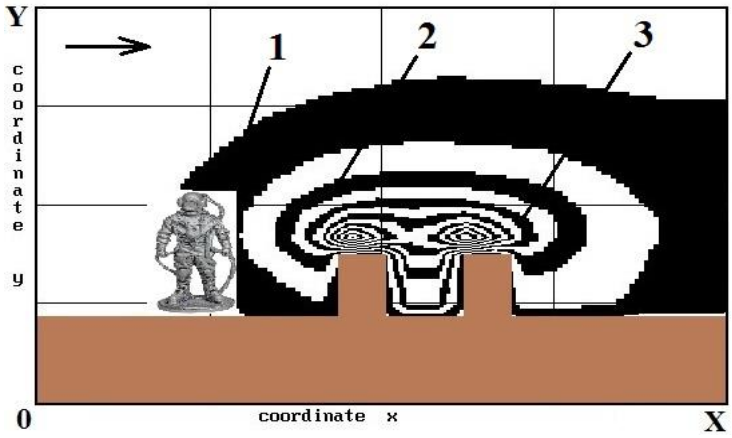


Рисунок 5.10 – Зона хімічного забруднення акваторії, *t*=17,1 с (другий сценарій):
1 – *C*=5 %; 2 – *C*=28 %; 3 – *C*=43 %.

Аналізуючи дані, що наведені на рисунках, можна бачити, що в разі витоку з двох пошкоджених підводних трубопроводів довжина зони забруднення акваторії збільшується в напряму руху водного потоку. Зона забруднення має складну форму, на формування якої впливають ложементи для підводних труб. Аналіз зони забруднення дозволяє визначити зони, що є небезпечними для водолаза на певний час після початку витікання агресивної речовини. Зауважимо, що час розрахунку становив 9 с.

Висновки до розділу 5

1. Розроблено чисельну модель для оцінювання ризику термічного ураження водолаза в разі ліквідації аварії на пошкодженому підводному трубопроводі. Розроблена модель базується на використанні рівняння енергії та рівняння руху води, шо дозволило створити на їх базі комп’ютерний код, який дає можливість врахувати форму підводної траншеї, турбулентність потоку, швидкість водного потоку, температуру водного середовища, температуру речовини в пошкодженому трубопроводі.

2. Розроблено чисельну модель для оцінювання ризику хімічного ураження водолаза в разі ліквідації аварії на пошкодженому підводному трубопроводі. Розроблена модель базується на використанні рівняння масопереносу та рівняння руху води, що дозволило створити на їх базі комп’ютерний код, який дає можливість врахувати форму підводної траншеї, форму ложемента для трубопроводу, турбулентність потоку, швидкість водного середовища.

3. Обчислювальні експерименти, що були виконані на базі побудованих чисельних моделей, показали, що моделі мають широкий робочий діапазон та дозволяють розв’язувати задачі, які раніше не могли бути розв’язані на базі існуючих моделей.

РОЗДІЛ 6
ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖІ В СХОВИЩАХ ПАЛИВА ТА ТЕРМІЧНОГО УРАЖЕННЯ ПРАЦІВНИКІВ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖІ

Прогнозування та оцінювання ризику ураження людей у різних аварійних ситуаціях є дуже складним завданням, тому що величина цього ризику залежить від багатьох факторів [1, 2, 4, 7, 8, 37, 38, 41, 52, 54, 57, 59, 67, 69, 72, 79–81, 83, 87, 92, 95, 98, 117, 118, 144, 148, 149, 154, 159, 161, 170, 176, 190, 194]. Оцінювання ризику ураження працівників від дії різних вражальних факторів здійснюється методом математичного моделювання. Найчастіше для цього застосовують моделі Гаусса та чисельне моделювання [27, 37, 148, 154, 159, 170, 172, 175, 176, 190].

Серед задач цього класу необхідно видокремити дві важливі задачі: оцінювання ризику виникнення пожежі в сховищах палива та визначення ризику термічного ураження працівників [83, 111, 112]. У цьому розділі розглядається побудова ефективних математичних моделей, що спрямовані на розв’язання цих задач.

Основні положення розділу опубліковані автором у наукових працях [16, 26, 27, 32–38, 42, 45, 46].

6.1. Оцінювання ризику термічного ураження в разі займання цистерни з паливом

Небезпека термічного ураження людей виникає у різних аварійних ситуаціях, наприклад під час пожежі на різному технологічному обладнанні ТЕС (рис. 6.1) або на території підприємств галузі, що використовують нафтопродукти.

Рисунок 6.1 – Пожежа на Придніпровській ТЕС
(фото: https://www.unian.net/pogoda/news/10647030-na-yugo-zapade-lyuksemburga-pronessya-tornado-postradali-19-chelovek.html)

Мазут транспортують, як правило, залізничним транспортом, тому займання цистерн створює значну загрозу об’єктам, що розташовані біля транспортного коридору або в самому коридорі (рис. 6.2).

Рисунок 6.2 – Пожежа під час транспортування нафтопродуктів
(фото: https://delo.ua/econonomyandpoliticsinukraine/v-cherkasskoj-oblasti-soshli-s-relsov-vagony-s-neftju-gorjat-zhi-245148/)

Температура повітря біля місця пожежі може бути дуже високою. Рух повітряних мас призводить до формування зон термічного ураження на певній відстані від місця горіння [61, 63]. У цій зоні небезпеки можуть перебувати працівники та різні об’єкти (наприклад, адміністративні будівлі).

Для адекватного визначення ризику такого ураження необхідно мати спеціалізовані математичні моделі. Слід наголосити, що на формування зон термічного ураження впливають різні фізичні фактори. Тому математичні моделі, що розробляються для розв’язання задач оцінювання ризику термічного ураження, повинні враховувати найбільш суттєві з них, що впливають на формування полів температур біля об’єкта небезпеки.

Для оцінки техногенних ризиків широко використовують три класи моделей: емпіричні, аналітичні та чисельні [2, 4, 7, 12, 13, 17, 20, 21, 23–31, 34–38, 41–43, 46, 57, 154, 157, 159, 176]. Моделі кожного класу мають свої переваги та недоліки. Але сьогодні існує певний дефіцит моделей, що дозволяють визначити техногенний ризик з урахуванням комплексу фізичних факторів, що впливають на його величину (наприклад, урахування рельєфу місцевості, наявність різного роду перешкод та ін.). Тому розробка таких моделей є актуальним науковим завданням.

Ризик термічного ураження виникає при аварійному горінні вантажів, що транспортуються в значній кількості залізницею до об’єктів паливно-енергетичного комплексу. У цьому випадку виникає задача оцінки ризику ураження з метою визначення небезпечних зон біля транспортного коридору. Візьмемо до уваги, що якщо температура повітря в робочій зоні становить більш ніж 100^0C, при якій відбувається повна денатурація білка, то в цій точці робочої зони приймається, що ризик ураження дорівнює 100 %.

Базовим рівнянням для розрахунку теплових полів є рівняння енергії [26, 27, 32, 37, 38, 61, 83]:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial vT}{\partial y}=div\left(a\,grad\,T\right), \qquad (6.1)$$

де T – температура;

t – час;

u, v – складові вектора руху повітряного потоку;

x_i, y_i – декартові координати;

$a = \left(a_x, a_y\right)$ – коефіцієнти температуропровідності.

Розглянемо граничні умови для рівняння (6.1):

1. На межі, де повітряний потік входить в область:

$$T = T_{in},$$

де T_{in} – фонова температура повітря.

2. На межі, де повітряний потік виходить з розрахункової зони:

$$T_{i+1,j} = T_{i,j},$$

де $T_{i+1,j}$ – температура в останній різницевій комірці;

$T_{i,j}$ – температура в попередній різницевій комірці.

3. На поверхні об’єктів: $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$.

Початкова умова ($t = 0$): $T = T_0$, де T_0 – температура повітря в осередку пожежі, в іншій частині розрахункової області температура дорівнює фоновій температурі.

Оскільки ми будемо розглядати процес формування температурних полів у області, де є різного роду перешкоди, наприклад вагони, павільйони, то потрібно врахувати в математичній моделі деформацію поля температури при взаємодії нагрітого потоку з перешкодами. Врахування цього впливу можливо здійснити, якщо ми розрахуємо деформацію поля швидкості повітряного потоку при обтіканні перешкод. Для розв’язання цієї задачі будемо використовувати таке рівняння аеродинаміки [37, 38, 60, 76, 109]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \qquad (6.2)$$

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \qquad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \qquad (6.3)$$

де P – потенціал швидкості.

Граничні умови [109]:

1. $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ – на твердих межах;

2. $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$ – на межі, де потік «входить» в розрахункову область, V_n – відома швидкість повітря;

3. P=const – на межі «виходу» потоку.

На базі рівняння (6.2) та залежностей (6.3) визначається деформація поля швидкості повітряного потоку за наявності перешкод.

Для чисельного інтегрування рівнянь (6.1), (6.2) використовується кінцево-різницевий метод розв’язання. Чисельне інтегрування здійснюється на прямокутній різницевій сітці. Температура повітря та значення потенціалу швидкості повітряного потоку розраховується в центрах різницевих комірок. Компоненти вектора швидкості визначаються на сторонах різницевих комірок.

Для чисельного інтегрування (6.2) приведемо його до вигляду [100]

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \qquad (6.4)$$

де t – фіктивний час.

Для чисельного інтегрування цього рівняння використовуємо явну різницеву схему. Розрахункова залежність в такому випадку має вигляд [99, 100]:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \triangle t \frac{P_{i+1,j}^{n} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \triangle t \frac{P_{i,j+1}^{n} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}. \qquad (6.5)$$

Процедура визначення потенціалу швидкості закінчується, коли:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число (ε=0.001). Для початку розрахунку приймаємо $t = 0$: P=0.

Далі здійснюється розрахунок швидкості повітряного потоку:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \; v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}. \qquad (6.6)$$

Для контролю розрахунку поля швидкості повітряного потоку також паралельно виконувалося чисельне інтегрування рівняння (6.4) за методом умовної апроксимації [100]. У цьому випадку чисельне інтегрування здійснювалося двома етапами. Різницеві залежності на кожному етапі мають вигляд [100]:

– на першому етапі:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right];$$

– на другому етапі:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Далі визначалися значення компонент швидкості повітряного потоку на базі залежностей (6.6).

Після розрахунку швидкості повітряного потоку починається розв'язок рівняння енергії. Для розв'язку також використовуємо різницеву схему розщеплення. Спочатку виконаємо таке розщеплення:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial \nu T}{\partial y}=0. \tag{6.7}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(a_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(a_y\frac{\partial T}{\partial y}\right). \tag{6.8}$$

Для чисельного інтегрування рівняння (6.7) ми використовуємо такі залежності [109]:

$$\frac{\partial uT}{\partial x}=\frac{\partial u^{+}T}{\partial x}+\frac{\partial u^{-}T}{\partial x},$$

$$\frac{\partial \nu T}{\partial y}=\frac{\partial \nu^{+}T}{\partial y}+\frac{\partial \nu^{-}T}{\partial y},$$

$$u^{+}=\frac{u+|u|}{2}, u^{-}=\frac{u-|u|}{2},$$

$$\nu^{+}=\frac{\nu+|\nu|}{2}, \nu^{-}=\frac{\nu-|\nu|}{2},$$

$$\frac{\partial u^{+}T}{\partial x}\approx\frac{u^{+}_{i+1,j}T^{n+1}_{i,j}-u^{+}_{i,j}T^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x}=L^{+}_{x}T^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^{-}T}{\partial x}\approx\frac{u^{-}_{i+1,j}T^{n+1}_{i+1,j}-u^{-}_{i,j}T^{n+1}_{i,j}}{\Delta x}=L^{-}_{x}T^{n+1},$$

$$\frac{\partial \nu^{+}T}{\partial y}\approx\frac{\nu^{+}_{i,j+1}T_{i,j}-\nu^{+}_{i,j}T_{i,j-1}}{\Delta y}=L^{+}_{y}T^{n+1},$$

$$\frac{\partial \nu^{-}T}{\partial y}\approx\frac{\nu^{-}_{i,j+1}T_{i,j+1}-\nu^{-}_{i,j}T_{i,j}}{\Delta y}=L^{-}_{y}T^{n+1}.$$

Схема розщеплення для рівняння (6.7) записується так [109]:

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{T_{i,j}^{k}-T_{i,j}^{n}}{\Delta t}+L^{+}{}_{x}T^{k}+L^{+}{}_{y}T^{k}=0; \tag{6.9}$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{T_{i,j}^{n+1}-T_{i,j}^{k}}{\Delta t}+L^{-}{}_{x}T^{n+1}+L^{-}{}_{y}T^{n+1}=0. \tag{6.10}$$

Невідоме значення температури T в кожному рівнянні визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування рівняння (6.8) використовується явна різницева схема [99, 100]. Розрахункова залежність має вигляд

$$T_{i,j}^{n+1}=T_{i,j}^{n}+\triangle t\frac{T_{i+1,j}^{n}-2T_{i,j}^{n}+T_{i,j}^{n}}{\Delta x^{2}}a_{x}+\triangle t\frac{T_{i,\mathrm{j}+1}^{n}-2T_{i,j}^{n}+T_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^{2}}a_{y}. \tag{6.11}$$

Відзначимо також такий аспект: виконуючи розрахунки, можна прийняти, що значення коефіцієнта температуропровідності приблизно дорівнює значенню коефіцієнта дифузії, що визначається залежностями, які були розглянуті вище. Це пов’язано з тим, що в турбулентному потоці число Прандтля приблизно дорівнює 1.

Здійснено програмну реалізацію розглянутих різницевих залежностей, що створюють основу побудованої чисельної моделі. На базі розробленої чисельної моделі створено код TaWG, мова програмування – FORTRAN. До складу коду входять:

– TaW0.DAT – файл початкових даних;

– TaWK1 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку 2D-поля потенціалу швидкості в області дослідження на базі явної схеми;

– TaW3 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку 2D-поля потенціалу швидкості в області дослідження за методом умовної апроксимації;

– TaWK2 – підпрограма типу SUBROUTINE для визначення значення 2D поля швидкості повітря в області дослідження;

– TaWK – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку рівняння теплопереносу;

– TWKA – підпрограма SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язку рівняння конвективного переносу тепла;

– TWK5 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля температури в області дослідження.

Алгоритм розв’язання задачі:

1. У файл початкових даних вводиться інформація щодо розташування об’єктів на території небезпеки, місце пожежі тощо.

2. Здійснюється чисельний розв’язок 2D-рівняння для потенціалу швидкості.

3. Визначається 2D-поле швидкості потоку повітря в області дослідження.

4. Розраховується поле температури в області дослідження.

5. Здійснюється друк поля температури в робочій зоні.

Вихідні дані для моделювання:

1. Дані щодо об’єктів на території небезпеки, їх геометрична форма.

2. Швидкість та напрям вітру.

3. Місце пожежі.

4. Температура повітря на місці пожежі.

Нижче наведено результати розв’язання задачі з визначення ризику термічного ураження людей в залізничному вагоні в разі виникнення пожежі на цистерні. На рис. 6.3 показано схему розрахункової області. Розміри

області 20 м х 20 м; швидкість повітря 5 м/с, коефіцієнт температуропровідності 5 $м^2/с$.

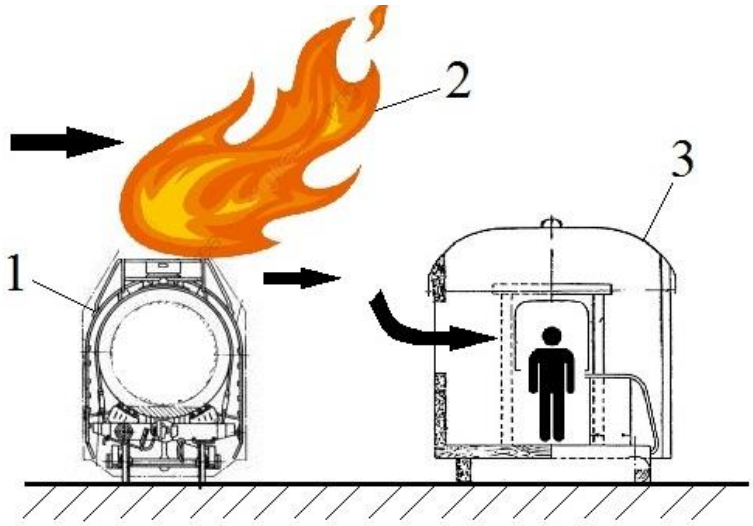


Рисунок 6.3 – Схема розрахункової області:
1 – місце горіння; 2 – полум’я; 3 – пасажирський вагон.

На наведених нижче рисунках показана зміна температури в розрахунковій області. Кожне число показує температуру, у відсотках, від максимальної температури $T = 1000^{\circ} C$, тобто, наприклад, число 47 на рисунку відповідає температура $T = 470^{\circ} C$. Такий друк температурного поля є дуже зручним для швидкого аналізу теплового забруднення повітря та визначення меж зони ризику термічного ураження, тобто зони, де температура перевищує $T = 100^{\circ} C$.

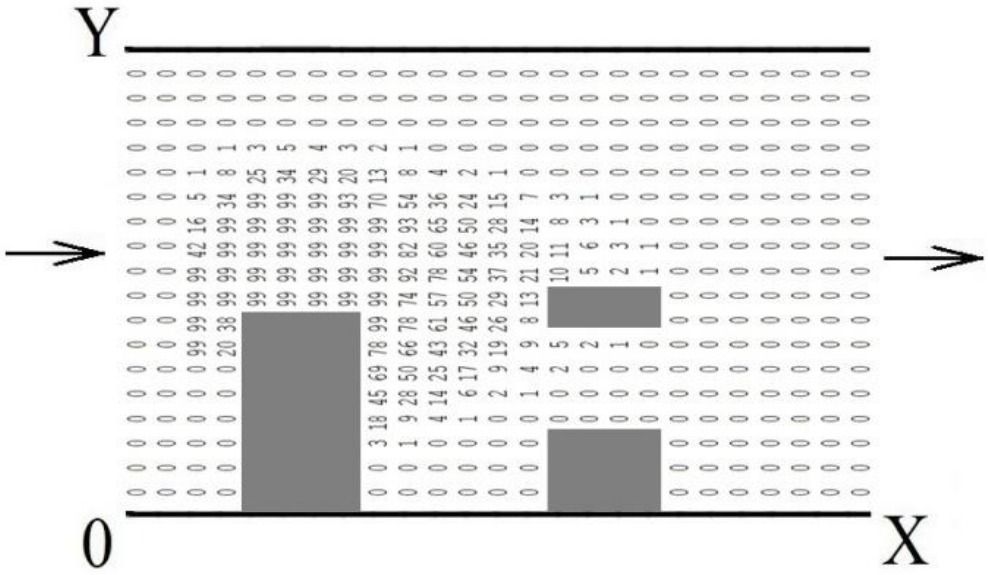


Рисунок 6.4 – Зона теплового забруднення (ізотерми), *t*=5 с

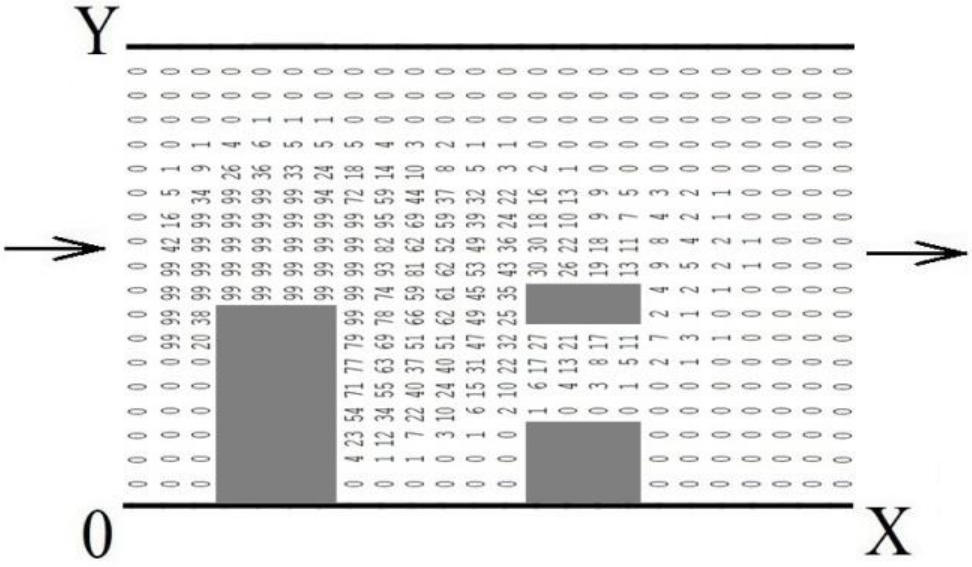


Рисунок 6.5 – Зона теплового забруднення (ізотерми), *t*=10 с

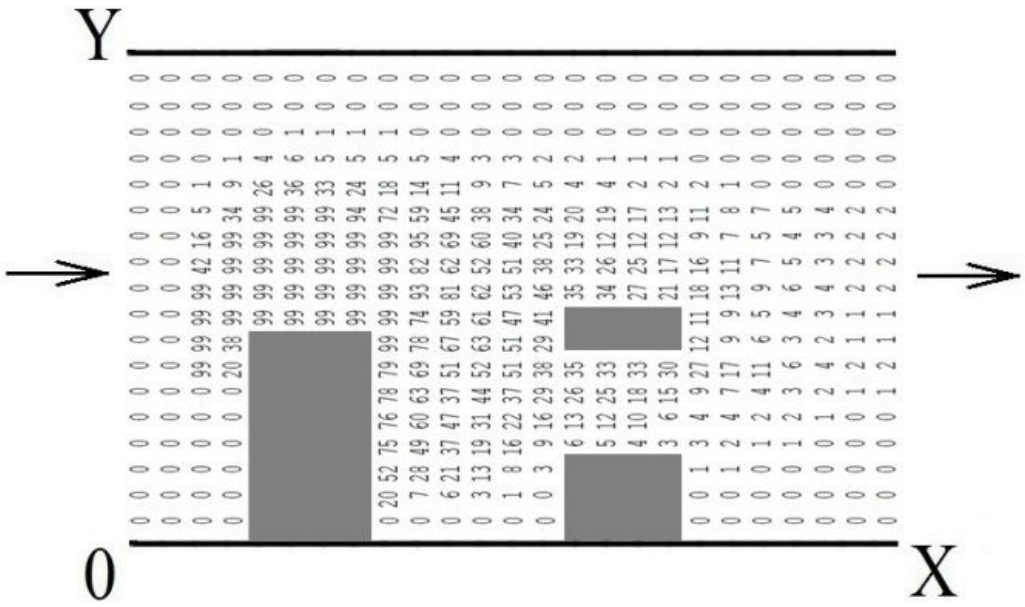


Рисунок 6.6 – Зона теплового забруднення (ізотерми), *t*=15 с

Як ми бачимо з наведених рисунків, біля місця пожежі формується інтенсивна зона теплового забруднення. Дуже швидко нагріте повітря потрапляє всередину пасажирського вагона, що викликає ризик термічного ураження людей у ньому. Для аналізу ризику термічного ураження людей побудовано графік зміни температури з часом всередині вагона (рис. 6.7).

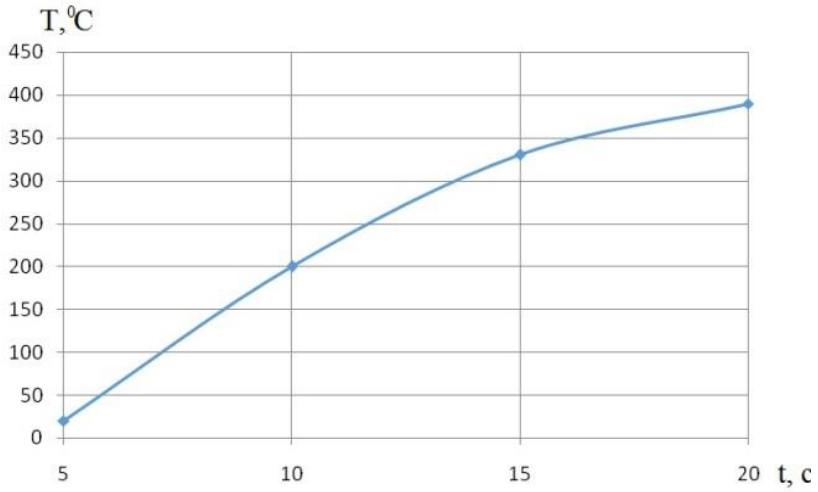


Рисунок 6.7 – Зміна температури повітря всередині вагона

З рис. 6.7 ми бачимо, що приблизно за 8 с після початку пожежі температура всередині вагона перевищує $T = 100^{\circ}C$. Тобто це момент часу, коли виникає ризик термічного ураження людей у вагоні з тяжкими наслідками.

Зауважимо, що час розрахунку становить 4 с.

6.2. Оцінювання ризику термічного ураження працівників у разі пожежі в умовах забудови

Пожежі на об’єктах з нафтопродуктами є дуже небезпечним явищем. У разі виникнення такої надзвичайної ситуації на АЗС існує ризик термічного ураження працівників (рис. 6.8). Нижче розглядається використання побудованої 2D-чисельної моделі, що була розглянута раніше, для оцінювання ризику термічного ураження працівників під час пожежі на АЗС.

Рисунок 6.8 – Пожежа на АЗС
(фото: https://ukranews.com/ua/news/632576-na-zapravtsi-v-zhytomyri-spalahnula-serjozna-pozhezha-postrazhdaly-lyudy-i-zgorily-mashyny)

Розглядається ймовірна пожежа на АЗС фірми «ABIAC», що розташована на вул. Робоча (м. Дніпро) (рис. 6.9). На рис. 6.9 показано місце ймовірного займання палива. На цьому рисунку також показано дві робочі зони біля АЗС. Розміри розрахункової області 90 м × 40 м, швидкість вітру 8 м/с; температура полум'я 1100 ^{0}C. Коефіцієнти температуропровідності по напряму *x, y* приймаються 8 м^2/с. Полум'я на місці пожежі задається за допомогою маркерів.

Рисунок 6.9 – Схема розрахункової області (Google image, 2020):
1 – місце пожежі; 2 – робоча зона 1; 3 – робоча зона 2.

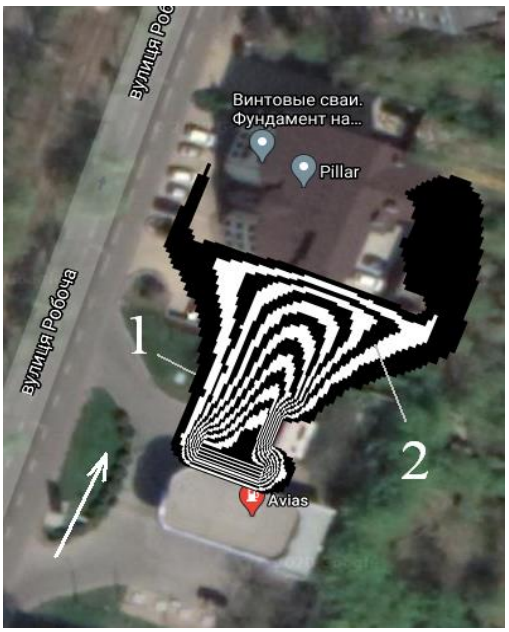


Рисунок 6.10 – Зона теплового забруднення, *t*=6 с:
1 – T=110 ^{0}C, 2 – T=250 ^{0}C.

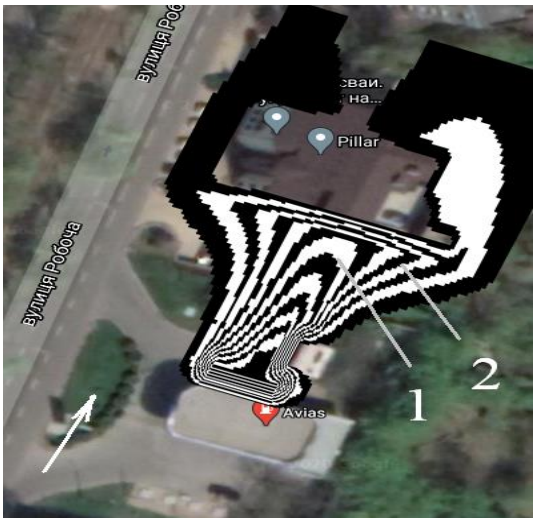


Рисунок 6.11 – Зона теплового забруднення, *t*=10 с:
1 – T=697 ^{0}C, 2 – T=403 ^{0}C.

Як бачимо з наведених рисунків, у разі виникнення пожежі на АЗС зона термічного забруднення дуже швидко поширюється й на промислових майданчиках, що розташовані біля місця пожежі, формуються області з дуже високою температурою, тобто ризик термічного ураження неймовірно

високий. Слід звернути увагу на те, що на формування зони теплового забруднення впливають об’єкти, розташовані біля АЗС.

На рис. 6.12 та 6.13 показано, як швидко змінюється значення температури на промислових майданчиках у двох робочих зонах.

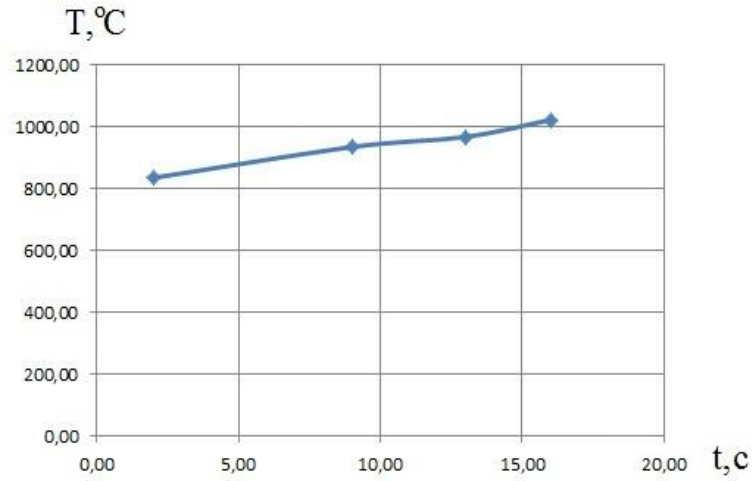


Рисунок 6.12 – Зміна температури в робочій зоні 1

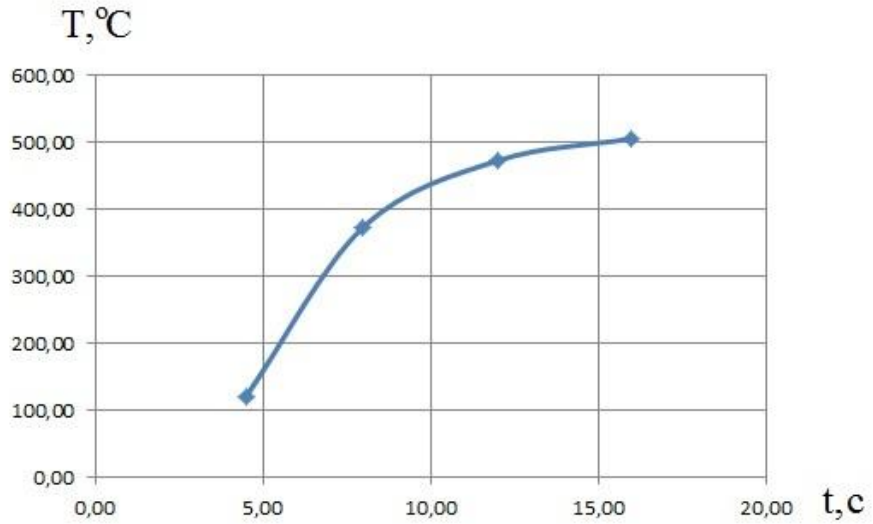


Рисунок 6.13 – Зміна температури в робочій зоні 2

Якщо прийняти, що ризик термічного ураження виникає, коли температура повітря перевищує $T = 100^{\circ}C$, то, як ми бачимо з рис. 6.12 та 6.13, термічне ураження працівників у робочій зоні 1 уже станеться за 2 с, а в робочій зоні 2 – за 5 с.

Зауважимо, що час розрахунку на ПК становить 5 с.

На наступному етапі досліджень була побудована 3D чисельна модель для оцінювання ризику термічного ураження працівників у випадку пожежі. Моделюючі рівняння цієї моделі такі [38, 109]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}=0, \tag{6.12}$$

$$u=\frac{\partial P}{\partial x},\ v=\frac{\partial P}{\partial y}\quad w=\frac{\partial P}{\partial z}, \tag{6.13}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial vT}{\partial y}+\frac{\partial (w+w_s)T}{\partial z}=div\left(a\,grad\,T\right), \tag{6.14}$$

де P – потенціал швидкості;

x, y, z – декартові координати;

u, v, w – складові вектора руху повітряного потоку;

T – температура;

t – час;

$a=\left(a_x, a_y, a_z\right)$ – коефіцієнти температуропровідності;

w_s – швидкість руху нагрітого повітря вгору.

Розглянемо граничні умови для рівняння (6.11):

1. На межі, де повітряний потік входить в область:

$$T=T_{in},$$

де T_{in} – фонова температура повітря.

2. На межі, де повітряний потік виходить з розрахункової зони:

$$T_{i+1,j}=T_{i,j},$$

де $T_{i+1,j}$ – температура в останній різницевій комірці;

$T_{i,j}$ – температура в попередній комірці.

3. На поверхні об’єктів $\frac{\partial T}{\partial n}=0$.

4. $\frac{\partial P}{\partial n}=0$ – на твердих межах (бокові поверхні, верхня поверхня, нижня поверхня).

5. $\frac{\partial P}{\partial n}=V_n$ – на межі, де потік «входить» до розрахункової зони, V_n – відома швидкість повітря.

6. P=const – на межі «виходу» потоку.

Початкова умова ($t=0$): $T=T_0$, де T_0 – температура повітря в осередку пожежі, в іншій частині розрахункової області температура дорівнює фоновій температурі.

Для чисельного інтегрування рівнянь (6.12), (6.14) використовуються кінцево-різницеві методи розв’язання. Чисельне інтегрування здійснюється на прямокутній різницевій сітці. Температура повітря та значення потенціалу швидкості повітряного потоку розраховується в центрах різницевих (контрольних) об’ємів. Компоненти вектора швидкості визначаються на сторонах контрольних об’ємів.

Для чисельного інтегрування (6.12) приведемо його до вигляду [100, 109]:

$$\frac{\partial P}{\partial t}=\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}. \qquad (6.15)$$

де t – фіктивний час.

Для чисельного інтегрування цього рівняння використовуємо явну різницеву схему. Розрахункова залежність у такому випадку має вигляд [99, 100]:

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^{n} + \Delta t \frac{P_{i+1,j,k}^{n} - 2P_{i,j,k}^{n} + P_{i,j,k}^{n}}{\Delta x^2} + \\ + \Delta t \frac{P_{i,\mathrm{j}+1,k}^{n} - 2P_{i,j,k}^{n} + P_{i,j-1,k}^{n}}{\Delta y^2} + \\ + \Delta t \frac{P_{i,\mathrm{j},k+1}^{n} - 2P_{i,j,k}^{n} + P_{i,j,k-1}^{n}}{\Delta z^2} \qquad (6.16)$$

Процедура визначення потенціалу швидкості закінчується, коли

$$\left| P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число. Для початку розрахунку приймаємо: $t = 0$, P=0.

Далі здійснюється розрахунок швидкість повітряного потоку:

$$u_{ijk} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x},\ v_{ijk} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y},\ w_{ijk} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z}. \qquad (6.17)$$

Для контролю розрахунку поля швидкості повітряного потоку паралельно виконувалося чисельне інтегрування рівняння (6.12) за методом умовної апроксимації. У цьому випадку чисельне інтегрування здійснювалося двома етапами. Різницеві залежності на кожному етапі мають вигляд [100]:

– на першому етапі:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j,k}^{n}}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right],$$

– на другому етапі:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1}-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t}=\left[\frac{P_{i+1,j,k}^{n+1}-P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}\right]+\left[\frac{P_{i,j+1,k}^{n+1}-P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2}\right]+\left[\frac{P_{i,\mathrm{j},\mathrm{k}+1}^{n+1}-P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2}\right].$$

Далі визначалися значення компонент швидкості повітряного потоку на базі залежностей (6.17).

Після розрахунку швидкості повітряного потоку починається розв'язання рівняння енергії. Для цього також використовуємо неявну різницеву схему розщеплення. Спочатку виконаємо таке розщеплення [77]:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial vT}{\partial y}+\frac{\partial wT}{\partial z}=0. \qquad (6.18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(a_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(a_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(a_z\frac{\partial T}{\partial z}\right). \qquad (6.19)$$

Зауважимо, що тут використовується позначення $w=w+w_s$. Для чисельного інтегрування рівняння (6.14) ми використовуємо такі залежності [109]:

$$\frac{\partial uT}{\partial x}=\frac{\partial u^{+}T}{\partial x}+\frac{\partial u^{-}T}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vT}{\partial y}=\frac{\partial v^{+}T}{\partial y}+\frac{\partial v^{-}T}{\partial y},$$

$$\frac{\partial wT}{\partial z}=\frac{\partial w^{+}T}{\partial w}+\frac{\partial w^{-}T}{\partial z},$$

$$u^+ = \frac{u+|u|}{2}, u^- = \frac{u-|u|}{2},$$

$$v^+ = \frac{v+|v|}{2}, v^- = \frac{v-|v|}{2}$$

$$w^+ = \frac{w+|w|}{2}, w^- = \frac{w-|w|}{2},$$

$$\frac{\partial u^+ T}{\partial x} \approx \frac{u^+_{i+1,j,k} T^{n+1}_{i,j,k} - u^+_{i,j,k} T^{n+1}_{i-1,j,k}}{\Delta x} = L^+_x T^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- T}{\partial x} \approx \frac{u^-_{i+1,j,k} T^{n+1}_{i+1,j,k} - u^-_{i,j,k} T^{n+1}_{i,j,k}}{\Delta x} = L^-_x T^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ T}{\partial y} \approx \frac{v^+_{i,j+1,k} T_{i,j,k} - v^+_{i,j,k} T_{i,j-1,k}}{\Delta y} = L^+_y T^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- T}{\partial y} \approx \frac{v^-_{i,j+1,k} T_{i,j+1,k} - v^-_{i,j,k} T_{i,j,k}}{\Delta y} = L^-_y T^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^- T}{\partial z} \approx \frac{w^-_{i,j,k+1} T^{n+1}_{i,j,k+1} - w^-_{i,j,k} T^{n+1}_{i,j,k}}{\Delta z} = L^-_z T^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^+ T}{\partial z} \approx \frac{w^+_{i,j,k+1} T_{i,j,k} - w^+_{i,j,k} T_{i,j,k-1}}{\Delta y} = L^+_z T^{n+1}.$$

Схема розщеплення для рівняння (6.14) записується так [109]:

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{T^k_{i,j} - T^n_{i,j}}{\Delta t} + L^+{}_x T^k + L^+{}_y T^k + L^+{}_z T^k = 0; \qquad (6.20)$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{T_{i,j}^{n+1}-T_{i,j}^{k}}{\Delta t}+L^{-}{}_{x}T^{n+1}+L^{-}{}_{y}T^{n+1}+L^{-}{}_{z}T^{n+1}=0. \qquad (6.21)$$

Невідоме значення температури T у кожному рівнянні визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування рівняння (6.18) використовується явна різницева схема. Розрахункова залежність має вигляд [99, 100]

$$T_{i,j,k}^{n+1}=T_{i,j,k}^{n}+\triangle t\frac{T_{i+1,j,k}^{n}-2T_{i,j,k}^{n}+T_{i,j,k}^{n}}{\Delta x^{2}}a_{x}+$$

$$+\triangle t\frac{T_{i,\mathrm{j}+1,k}^{n}-2T_{i,j,k}^{n}+T_{i,j-1,k}^{n}}{\Delta y^{2}}a_{y}+ \qquad (6.22)$$

$$+\triangle t\frac{T_{i,\mathrm{j},\mathrm{k}+1}^{n}-2T_{i,j,\mathrm{k}}^{n}+T_{i,j,k-1}^{n}}{\Delta z^{2}}a_{z}.$$

Здійснено програмну реалізацію розглянутих різницевих 3D-залежностей, що створюють основу побудованої чисельної моделі. На базі розробленої чисельної моделі створено код Ta3G, мова програмування – FORTRAN. До складу коду входять:

– Ta03.DAT – файл початкових даних;

– TaW3 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку 3D-поля потенціалу швидкості в області дослідження на базі явної різницевої схеми;

– TaW31 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку 3D -поля потенціалу швидкості в області дослідження на базі методу умовної апроксимації;

– TaW32 – підпрограма типу SUBROUTINE для визначення значення 3D-поля швидкості повітря в області дослідження;

– TaW3K – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку 3D-рівняння теплопереносу;

– TW3K підпрограма SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язку 3D-рівняння конвективного переносу тепла;

– TW35 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля температури в області дослідження.

Алгоритм розв’язання задачі такий:

1. У файл початкових даних вводиться інформація щодо розташування об’єктів на території небезпеки, місце пожежі та таке інше.

2. Здійснюється чисельний розв’язок 3D-рівняння для потенціалу швидкості.

3. Визначається 3D-поле швидкості потоку повітря в області дослідження.

4. Розраховується 3D-поле температури в області дослідження.

5. Здійснюється друк поля температури в робочий зоні.

Вихідні дані для моделювання:

1. Дані щодо об’єктів на території небезпеки, їх геометрична форма.

2. Швидкість та напрям вітру.

3. Місце пожежі.

4. Температура повітря на місці пожежі.

Нижче наведено результати розв’язання попередньої задачі з визначення полів температури в разі пожежі. Розрахунок здійснюється в тривимірній постановці. Розглядається пожежа на АЗС (перший будинок на рис. 6.9).

Розміри розрахункової області 90 м × 40 м × 40 м, швидкість вітру 8 м/с; температура полум’я 1100^0С. Коефіцієнти температуропровідності по напряму *x, y* приймаються 8 $м^2$/с, швидкість піднімання нагрітого повітря 2 м/с. Полум’я на місці пожежі задається за допомогою маркерів. Цьому місцю відповідають числа «99» на рисунках, що наведені нижче. На цих рисунках показано поле температури (переріз $y = 40$ м) для різних моментів часу після виникнення пожежі на АЗС.

Рисунок 6.14 – Зона теплового забруднення, *t*=8 с, переріз *y*=40 м

Рисунок 6.15 – Зона теплового забруднення, *t*=12 с, переріз *y* =40 м

Як можна бачити з наведених рисунків, зона теплового забруднення має вигляд «шлейфу», що поширюється в повітрі в напряму руху повітряного потоку. Це призводить то значного температурного фону біля будинків. Так, температура повітря на даху павільйону (робоча зона 1) дорівнює величині порядку 990 ^{0}C. Тобто є загроза руйнування павільйону в робочій зоні 1.

Побудована чисельна модель дозволяє визначити також зміну температури в приміщенні, що розташовано поблизу місця пожежі при припливі в це приміщення нагрітого повітря. Як можна бачити з рис. 6.14 та

6.15, у приміщенні відбувається процес зростання температури повітря. На рис. 6.16 показано, як змінюється температура повітря в приміщенні з часом.

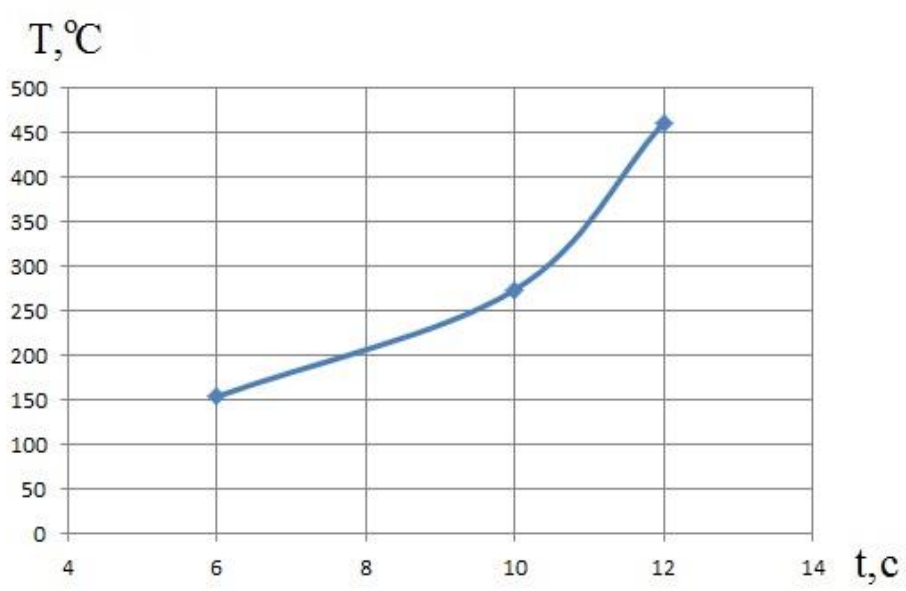


Рисунок 6.16 – Зміна максимальної температури в приміщенні з часом

Аналізуючи дані на рис. 6.16, можна зробити висновок, що дуже швидко в приміщенні буде висока температура повітря, що призведе до термічного ураження працівників.

Далі було розроблено інший комплекс чисельних моделей для розв’язання задачі з оцінювання ризику термічного ураження працівників під час пожежі. Як моделюючі використовувалися рівняння енергії та аеродинаміки (6.1), (6.2).

Рівняння (6.2) приводилося до «нестаціонарного» вигляду [100]

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \tag{6.23}$$

де t – фіктивний час.

Перша різницева схема для чисельного інтегрування (6.23) має

вигляд [99, 100]:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \triangle t \frac{P_{i+1,j}^{n} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \triangle t \frac{P_{i,\mathrm{j}+1}^{n} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}. \quad (6.24)$$

Друга різницева схема для чисельного розв'язання (6.23) базується на геометричному розщепленні таким чином [100]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (6.25)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \quad (6.26)$$

Різницева схема для чисельного рішення (6.25) має вигляд [99]

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \triangle t \frac{P_{i+1,j}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \triangle t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2} \quad (6.27)$$

Різницева схема для чисельного рішення (6.26) має вигляд [99]

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \triangle t \frac{P_{i,j+1}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta y^2} + \triangle t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2} \quad (6.28)$$

Розрахунок при використанні обох чисельних моделей закінчується за виконання умови

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число.

Далі розраховуються компоненти вектора швидкості повітряного потоку:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x},\ v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Для чисельного інтегрування рівняння енергії (6.1) здійснюється його розщеплення [77]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = 0, \tag{6.29}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right). \tag{6.30}$$

Далі використовуються такі трансформації [109]:

$$\frac{\partial uT}{\partial x} = \frac{\partial u^+ T}{\partial x} + \frac{\partial u^- T}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial v^+ T}{\partial y} + \frac{\partial v^- T}{\partial y},$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}, u^- = \frac{u - |u|}{2},$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^{+}T}{\partial x} \approx \frac{u^{+}_{i+1,j}T^{n+1}_{i,j} - u^{+}_{i,j}T^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x} = L^{+}_{x}T^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^{-}T}{\partial x} \approx \frac{u^{-}_{i+1,j}T^{n+1}_{i+1,j} - u^{-}_{i,j}T^{n+1}_{i,j}}{\Delta x} = L^{-}_{x}T^{n+1},$$

$$\frac{\partial \nu^{+}T}{\partial y} \approx \frac{\nu^{+}_{i,j+1}T_{i,j} - \nu^{+}_{i,j}T_{i,j-1}}{\Delta y} = L^{+}_{y}T^{n+1},$$

$$\frac{\partial \nu^{-}T}{\partial y} \approx \frac{\nu^{-}_{i,j+1}T_{i,j+1} - \nu^{-}_{i,j}T_{i,j}}{\Delta y} = L^{-}_{y}T^{n+1}.$$

З урахуванням цих трансформацій схема розщеплення для (6.29) має вигляд [109]:

– на першому кроці:

$$\frac{T^{k}_{i,j} - T^{n}_{i,j}}{\Delta t} + L^{+}{}_{x}T^{k} + L^{+}{}_{y}T^{k} = 0;$$

– на другому кроці:

$$\frac{T^{n+1}_{i,j} - T^{k}_{i,j}}{\Delta t} + L^{-}{}_{x}T^{n+1} + L^{-}{}_{y}T^{n+1} = 0;$$

Значення температури визначається на кожному кроці за явною схемою.

Для чисельного розв’язання (6.30) використовується явна схема [99]:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^{n} + \Delta t \frac{T_{i+1,j}^{n} - 2T_{i,j}^{n} + T_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} a_x + \Delta t \frac{T_{i,j+1}^{n} - 2T_{i,j}^{n} + T_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2} a_y . \quad (6.31)$$

Для побудови другої різницевої схеми для чисельного інтегрування рівняння енергії здійснюється така апроксимація других похідних [109]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \approx a_x \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - a_x \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^{-} T^{n+1} + M_{xx}^{+} T^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \approx a_y \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - a_y \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^{-} T^{n+1} + M_{yy}^{+} T^{n+1},$$

З урахуванням цих залежностей, апроксимація рівняння (6.1) має вигляд

$$\begin{aligned} &\frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^{n}}{\Delta t} + L_x^{+} T^{n+1} + L_x^{-} T^{n+1} + L_y^{+} T^{n+1} + L_y^{-} T^{n+1} = \\ &= (M_{xx}^{+} T^{n+1} + L_{xx}^{-} T^{n+1} + L_{yy}^{+} T^{n+1} + L_{yy}^{-} T^{n+1}). \end{aligned} \quad (6.32)$$

Далі має місце розщеплення (6.32) на чотири кроки [109]:

– на першому кроці ($k = \frac{1}{4}$):

$$\begin{aligned} &\frac{T_{i,j}^{n+k} - T_{i,j}^{n}}{\Delta t} + \frac{1}{2}\left(L_x^{+} T^{n+k} + L_y^{+} T^{n+k} \right) = \\ &= \frac{1}{4}\left(M_{xx}^{+} T^{n+k} + M_{xx}^{-} T^{n} + M_{yy}^{+} T^{n+k} + M_{yy}^{-} T^{n} \right) \end{aligned} ; \quad (6.33)$$

– на другому кроці ($k = n + \frac{1}{2}, c = n + \frac{1}{4}$):

$$\frac{T_{ij}^{k} - T_{ij}^{c}}{\Delta t} + \frac{1}{2}\left(L_x^{-} T^{k} + L_y^{-} T^{k}\right) = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^{-} T^{k} + M_{xx}^{+} T^{c} + M_{yy}^{-} T^{k} + M_{yy}^{+} T^{c}); \tag{6.34}$$

– на третьому кроці ($k = n + \frac{3}{4}, c = n + \frac{1}{2}$) використовується залежність (6.34);

– на четвертому кроці ($k = n + 1, c = n + \frac{3}{4}$) використовується залежність (6.33).

Здійснена програмна реалізація побудованих чисельних моделей, мова програмування – FORTRAN. До складу коду FIRE-22 входять такі підпрограми:

– Tn00.DAT – файл початкових даних;

– Tn8 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку поля потенціалу швидкості в області дослідження на базі першої чисельної моделі;

– Tn9 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку поля потенціалу швидкості в області дослідження на базі другої чисельної моделі;

– Tn10 – підпрограма типу SUBROUTINE для визначення значення поля швидкості повітря в області дослідження;

– Tn11 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку рівняння енергії на базі першої чисельної моделі;

– Tn12 – підпрограма SUBROUTINE для розв’язання рівняння енергії на базі другої чисельної моделі;

– Tn13 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля температури в області дослідження.

На базі розроблених чисельних моделей було виконано обчислювальний експеримент. На рис. 6. 17 показано розрахункову область.

Рисунок 6.17 – Розрахункова область (Google image 2021):
1 – АЗС (місце пожежі); 2 – ринок «Слов'янський»; 3, 4 – робочі зони.

Обчислювальний експеримент виконувався за таких даних: швидкість повітряного потоку 10 м/с; коефіцієнт температуропровідності 4 $м^2/с$; фонова температура 20 ^{0}C, температура на місце пожежі 1100 ^{0}C.

Нижче на рисунках показано зону теплового забруднення для різних моментів часу.

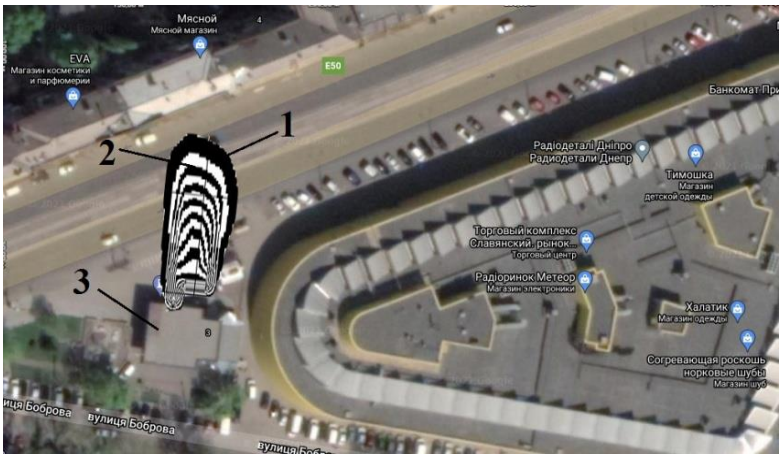


Рисунок 6.18 – Зона теплового забруднення, t = 4 с:
1 – T=130 ^{0}C; 2 – T=275 ^{0}C; 3 – АЗС.

Рисунок 6.19 – Зона теплового забруднення, t = 9 с:
1 – Т=200 ^{0}С; 2 – Т=423 ^{0}С; 3 – АЗС.

Як можна бачити з наведених рисунків, зона теплового забруднення дуже швидко формується під дією потоку повітря. Перебування працівника всередині теплового «шлейфа» призведе до його термічного ураження внаслідок дуже високої температури повітря в цій зоні. За 9 с після початку пожежі межа зони теплового забруднення досягне робочих зон на протилежному боці вулиці.

На рис. 6.20 показано, як змінюється температура повітря в робочій зоні 4.

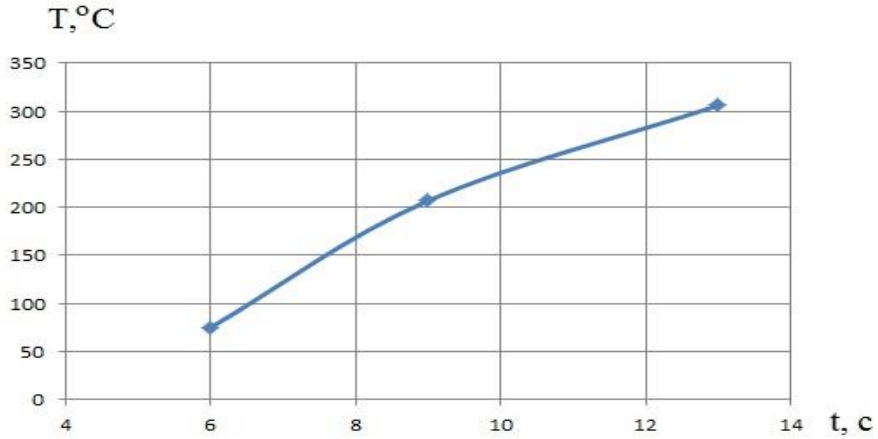


Рисунок 6.20 – Зміна температури повітря в робочої зоні 4

З рис. 6.20 випливає, що за t =8 с температура повітря буде значно перевищувати порогове значення (100 ^{0}C).

Зауважимо, що час розрахунку дорівнює 5 с.

Потік нагрітого повітря, що рухається від місця пожежі, зустрічає на шляху різні перешкоди, наприклад павільйони тощо (рис. 6.21).

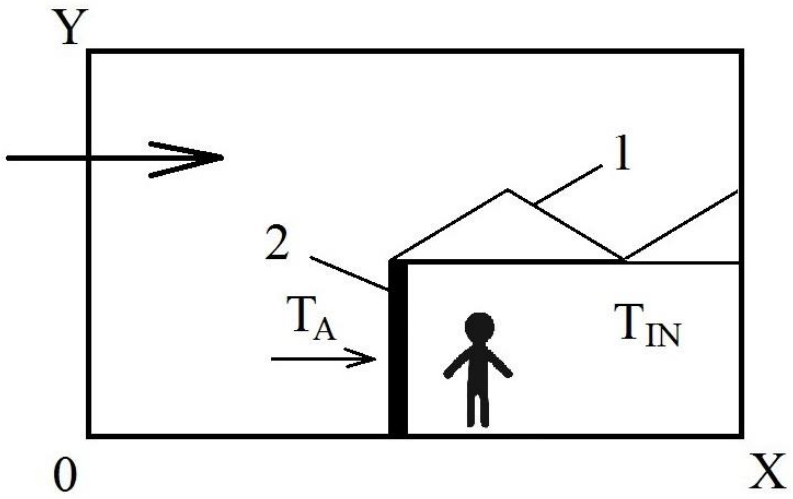


Рисунок 6.21 – Розрахункова схема:
1 – павільйон; 2 – стінка.

У зв’язку з цим виникає важлива задача з оцінювання ступеня прогрівання стінок об’єктів з метою визначення ризику руйнування споруди.

Для розрахунку ступеня прогрівання стінок використовується рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}), \qquad (6.35)$$

де T – температура всередині стінки;

a_x – коефіцієнт температуропровідності матеріалу стінки;

t – час.

Для рівняння (6.35) використовуються такі граничні умови (рис. 6.21):

1. На лівій межі (із зовнішньої сторони стінки) задається температура повітря на відкритій місцевості, що змінюється з часом:

$$T_A = T(t), \tag{6.36}$$

де t – час.

2. На правій межі цієї стінки (всередині приміщення) задається значення температури T_{IN} (наприклад, це температура повітря в робочій зоні). Далі в ході розрахунків гранична умова змінюється так:

$$T_{n-1} = T_n,$$

де T_{n-1} – температура в попередній розрахункової точці;

T_n – температура в останній розрахунковій точці.

Початкова умова – це значення температури всередині стінки $T = T_{IN}$.

Важливо акцентувати на такому: у цій роботи розв'язується пов'язана задача, а саме: виконується сумісний розв'язок рівнянь (6.1), (6.2), (6.35) та умови (6.36). Суть така:

1. Розв'язується «зовнішня» задача, тобто шляхом розв'язання моделюючого рівняння аеродинаміки визначається поле швидкості повітря в області дослідження.

2. Розв'язується «зовнішня» задача, тобто шляхом розв'язання моделюючого рівняння енергії визначається поле температури в повітрі біля будинків, павільйонів тощо для конкретного моменту часу.

3. Дослідник задає місце на павільйоні (або іншому об'єкті), де важливо дослідити процес прогрівання елемента конструкції (це місце можна назвати «реперна точка»).

4. Далі визначається температура повітря в конкретний момент часу біля реперної точки.

5. Починається розрахунок прогрівання стінки з урахуванням умови (6.36).

6. Далі для нового розрахункового кроку за часом розраховується нове значення температури повітря біля реперної точки.

7. Знову здійснюється розрахунок прогрівання стінки з урахуванням нового значення T_A в умові (6.36).

Таким чином визначається нестаціонарне значення температури стінки.

Для чисельного інтегрування моделюючого рівняння (6.35) використовується така різницева схема [99]:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \triangle t \cdot a_1 \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x^2} + \triangle t \cdot a_2 \frac{-T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2}.$$

Якщо матеріал стінки неоднорідний, то коефіцієнти температуропровідності визначаються так:

$$a_1 = \frac{2(a_{i+1} \cdot a_i)}{a_{i+1} + a_i},$$

$$a_2 = \frac{2(a_{i-1} \cdot a_i)}{a_{i-1} + a_i}.$$

де a_1, a_2 – коефіцієнти температуропровідності для різних шарів матеріалу стінки.

Здійснена програмна реалізація побудованої чисельної моделі. Розв'язок пов'язаної задачі (прогрів стінки + прогрів повітря біля павільйону тощо) реалізовано в коді «CONECT». Цей код є частиною коду «FIRE-22», що використовується для розв'язання «зовнішньої задачі», тобто для визначення динаміки прогрівання повітря біля місця пожежі.

Нижче наведено результати розв’язання пов’язаної задачі, отримані на базі розробленої чисельної моделі. Розглядається сценарій пожежі в одному з двох павільйонів. Павільйони розташовані на відстані 8 м один від одного; швидкість повітряного потоку 8 м/с; коефіцієнт температуропровідності 3,5 $м^2/с$; фонова температура повітря 20 ^{0}С, температура на місці пожежі 1100 ^{0}С. Висота кожного павільйону 4 м.

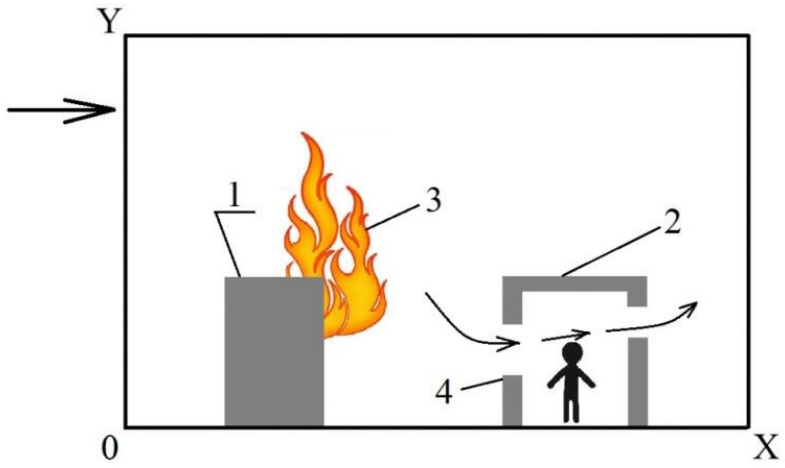


Рисунок 6.22 – Розрахункова схема:
1 – павільйон (місце пожежі); 2 – павільйон; 3 – полум’я; 4 – вікно.

На рис. 6.23 показано зону теплового забруднення для моменту часу t=1,72 с. Кожне число на цьому рисунку показує температуру повітря у відсотках від максимальної температури, що дорівнює 1100^{0}С (це маркер 99 на рисунку).

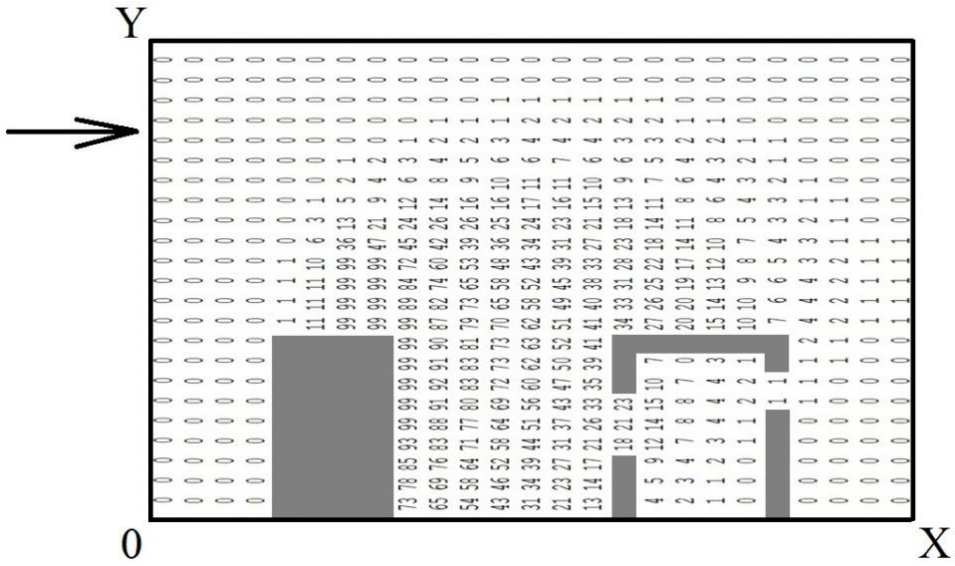


Рисунок 6.23 – Зона теплового забруднення, *t*=1,72 с

Як можна бачити з рис. 6.23, температура повітря в отворі вікна другого павільйону (робоча зона) дорівнює 18–23 % від максимальної температури, що відповідає значенню порядку 200 ^{0}C.

На рис. 6.24 показано, як змінюється температура стінки павільйону для різних моментів часу. Як реперна точка обрана точка, розташована на висоті 3,5 м. Коефіцієнт теплопровідності стінки 29·10 $^{-6}$ м^2/с; товщина стінки 3 мм.

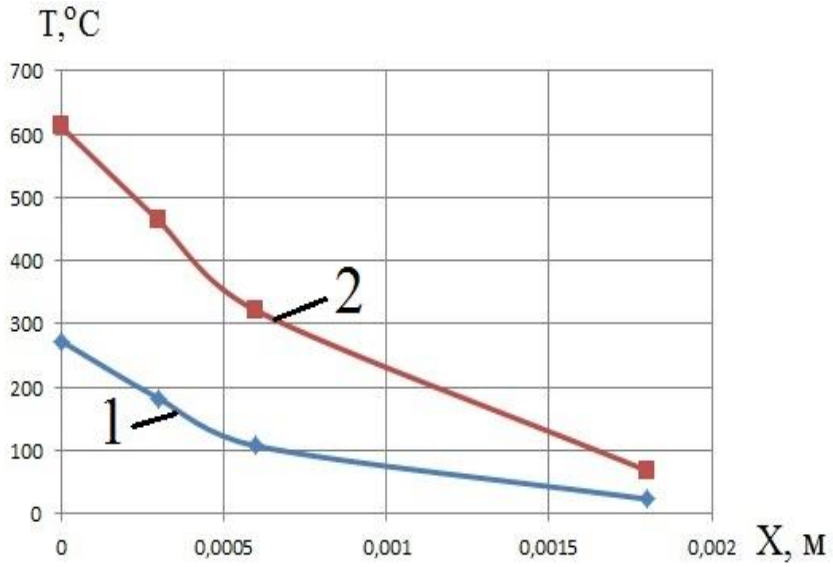


Рисунок 6.24 – Значення температури стінки для різних моментів часу: 1 – t =1,53 с; 2 – t =3,42 с.

Як можна бачити з рис. 6.24, процес нагрівання стінки йде дуже швидко, що створює загрозу її руйнування.

У табл. 6.1 показано температуру стінки для моменту часу 8 с.

Таблиця 6.1 – Розподіл температури в стінці

X, мм	0,06	0,12	0,18
Температура, ^{0}C	1798	1729	1662

Якщо прийняти, що деструкція матеріалу стінки починається при температурі порядку 1800 ^{0}C, то з табл. 6.1 можна бачити, що для цього моменту часу вже є ризик руйнування стінки павільйону.

Звернемо увагу, що час розв’язку задачі дорівнює 6 с.

6.3 Моделювання роботи водяної завіси, що використовується для захисту працівників від термічного ураження

Останнім часом значна увага приділяється проблемі захисту працівників від термічного ураження в разі виникнення пожежі за рахунок використання водяної завіси [53, 54, 65, 94]. У межах цієї проблеми виникає задача прогнозування ефективності використання водяної завіси в різних надзвичайних ситуаціях (рис. 6.25). Нижче розглянуто побудову математичної моделі для розв’язання цієї задачі.

Рисунок 6.25 – Захисна водяна завіса на промисловому об’єкті [53]

Розглянемо краплю води, що потрапила в повітря від устаткування, яке створює водяну завісу від термічного ураження працівників біля місця пожежі. Так, згідно із законом Срезневського [61] під час випарювання краплі її діаметр змінюється таким чином:

$$\frac{\partial D^2}{\partial t} = -k, \tag{6.38}$$

де D – діаметр краплі,

t – час,

k – параметр.

Залежність (6.38) показує математичну залежність зміни діаметра краплі від часу під час випарювання.

Параметр k має вигляд [61]

$$k = \frac{4\alpha D(T - T_k)}{\rho L}, \qquad (6.39)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі;

T – температура повітря;

T_k – температура краплі;

ρ – щільність рідини;

L – теплота випарювання рідини.

Потрібно наголосити, що під час руху краплі в нагрітому повітрі будуть відбуватися дуже складні процеси тепломасообміну: зміна температури краплі з часом, зміна її діаметра, випарювання тощо. Тому дуже складно розрахувати ці процеси на базі системи рівнянь тепломасообміну. Також, для розв'язання цих рівнянь потрібно використовувати експериментальні параметри, що для краплі, яка рухається, визначені приблизно. Крім цього, потрібно також зауважити, що для задач цього класу ми маємо дуже приблизні початкові дані – початковий діаметр крапель, швидкість струменів, швидкість повітря та інші. Тому для побудови експрес-моделі будемо використовувати інший підхід. Для цього виконаємо математичний аналіз залежності (6.39) та визначимо порядок величини k. Приймаємо такі дані:

α =115000 – 600 000 Вт/м^2 с;

ρ =1000 кг/м^3;

L =2260·10^3 Дж/кг;

T =2273 ^{0}C;

D =10^{-4} м;

T_k =373 ^{0}C.

Розраховуємо значення коефіцієнта *k:*

$$k = \frac{4\alpha D(T - T_k)}{\rho L} = \\ = \frac{4}{1000 \cdot 2260 \cdot 10^3} 600 \cdot 10^3 \cdot 10^{-4} \cdot 2000 = 0.2 \cdot 10^{-3}. \quad (6.40)$$

Для моделювання переносу крапель води в повітрі використовується таке рівняння [109]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (\nu - v_g)C}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \sum Q_i \cdot \delta(x - x_i)\delta(y - y_i). \quad (6.41)$$

де C – концентрація водяних крапель (кількість крапель в одиниці об’єму);

t – час;

u, v – компоненти вектора швидкості повітряного потоку;

v_g – швидкість гравітаційного осадження краплі води;

μ_x, μ_y – коефіцієнти атмосферної дифузії;

Q_i – інтенсивність подачі води;

$\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака;

(x_i, y_i) – координати місця подачі води.

Базовим рівнянням для розрахунку теплових полів під час пожежі є рівняння енергії [83]:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial vT}{\partial y}=div\left(a\,grad\,T\right), \tag{6.42}$$

де T – температура;

t – час;

u,v – складові вектора руху повітряного потоку;

$a=\left(a_x,a_y\right)$ – коефіцієнти температуропровідності;

x , y – декартові координати.

Для моделювання руху повітряного потоку використовується таке рівняння аеродинаміки [38, 109]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial^2 x}+\frac{\partial^2 P}{\partial^2 y}=0;$$
$$u=\frac{\partial P}{\partial x},\ \nu=\frac{\partial P}{\partial y}, \tag{6.43}$$

де P – потенціал швидкості.

Крайові умови для моделюючих рівнянь розглянуті раніше.

Визначивши порядок параметра *k* у залежності (6.38), будуємо такий алгоритм розв’язання задачі:

1. Задаємо початкові дані: початковий діаметр краплі D^n, об’єм води W , що потрапляє в повітря за одиницю часу.

2. Визначаємо кількість крапель в об’ємі:

$$n=\frac{W}{W_s},$$

де W_s – об'єм краплі ($W_s = \frac{4\pi}{3} R^3$, R – радіус краплі).

3. Чисельно інтегруємо рівняння конвективно-дифузійного переносу водяних крапель у повітрі та визначаємо розподіл концентрації крапель води в розрахунковій області на момент часу t^n.

4. Розраховуємо поле температур шляхом чисельного розв'язання рівняння енергії.

5. У кожній різницевій комірці розраховується зміна діаметра крапель на визначеному часовому інтервалі dt. Для цього використовуються залежності (6.38) та (6.40), тобто ми отримуємо дані щодо нового значення діаметра крапель D^{n+1} на новому часовому кроці.

6. Визначаємо масу води, що була випарувана за проміжок часу dt:

$$m_i = (W_s^n - W_s^{n+1}) \cdot \rho.$$

7. Визначаєтьсямо зміну температури повітря внаслідок випарювання маси води m_i. Для цього використовується балансова залежність щодо внутрішньої зміни енергії в різницевій комірці.

$$cmT^{n+1} = cmT^n - Lm_i,$$

де c – питома теплоємність;

m – маса повітря в різницевій комірці, $m = h_x \cdot h_y \cdot 1 \cdot \rho_a$ (h_x – різницевий крок в напрямку x; h_y – різницевий крок в напрямку y; ρ_a – густина повітря);

T^{n+1} – нове значення температури повітря на момент часу t^{n+1};

T^n – температура повітря на момент часу t^n.

Із цієї балансової залежності визначаємо нове значення температури повітря в кожній різницевій комірці для моменту часу t^{n+1}:

$$T^{n+1} = T^n - Lm_i / mc.$$

8. Розрахунок повторюється для нового часового кроку.

Для виконання розрахунків з оцінювання ефективності використання водяної завіси потрібно знати розподіл крапель води, температури повітря в кожній точці розрахункової області. Для цього потрібно проінтегрувати рівняння (6.1)–(6.6). Розглянемо методологію інтегрування. Чисельне інтегрування моделюючих рівнянь здійснюється на прямокутній різницевій сітці.

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа (6.4) використовуються дві різницеві схеми. Попередньо рівняння Лапласа записується так [109]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \qquad (6.44)$$

де t – фіктивний час.

Перший метод чисельного розв’язання – це явна різницева схема [99]. Розрахунок значення температури на новому часовому кроці здійснюється таким чином:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + \triangle t \frac{P_{i+1,j}^n - 2P_{i,j}^n + P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \\ + \triangle t \frac{P_{i,\mathrm{j}+1}^n - 2P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}. \qquad (6.45)$$

Другий метод чисельного розв’язання – це схема умовної апроксимації [100]. Розрахункові залежності мають вигляд [133, 134]:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Процедура розрахунку за цими методами закінчується, коли виконується умова

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число. Для початку розрахунку приймаємо, що для моменту часу $t = 0$ у розрахунковій області P=0.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку розраховуються так:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x},\ v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Після розрахунку швидкості повітряного потоку починається розв’язання рівняння масопереносу та рівняння енергії. Зауважимо, що рівняння енергії (6.42) та рівняння масопереносу (6.41) – однакові: це рівняння параболічного типу. Тому розглянемо побудову чисельної моделі тільки для рівняння (6.41).

Для розв’язання використовуємо неявну різницеву схему розщеплення.

Спочатку виконаємо таке фізичне розщеплення [77]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}=0. \tag{6.46}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right). \tag{6.47}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\sum Q_i\cdot\delta(x-x_i)\delta(y-y_i). \tag{6.48}$$

Тут використовується позначення $v=v+v_g$.

Апроксимація здійснюється таким чином [109]:

$$\frac{\partial uC}{\partial x}=\frac{\partial u^+C}{\partial x}+\frac{\partial u^-C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y}=\frac{\partial v^+C}{\partial y}+\frac{\partial v^-C}{\partial y},$$

$$u^+=\frac{u+|u|}{2},u^-=\frac{u-|u|}{2},$$

$$v^+=\frac{v+|v|}{2},v^-=\frac{v-|v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^+C}{\partial x}\approx\frac{u^+_{i+1,j}C^{n+1}_{i,j}-u^+_{i,j}C^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x}=L^+_xC^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^-C}{\partial x}\approx\frac{u^-_{i+1,j}C^{n+1}_{i+1,j}-u^-_{i,j}C^{n+1}_{i,j}}{\Delta x}=L^-_xC^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+C}{\partial y}\approx\frac{v^+_{i,j+1}C_{i,j}-v^+_{i,j}C_{i,j-1}}{\Delta y}=L^+_yC^{n+1},$$

$$\frac{\partial \nu^{-} C}{\partial y} \approx \frac{\nu^{-}_{i,j+1} C_{i,j+1} - \nu^{-}_{i,j} C_{i,j}}{\Delta y} = L^{-}_{y} C^{n+1}.$$

Схема розщеплення рівняння (6.46) така [109]:

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{C^{k}_{i,j} - C^{n}_{i,j}}{\Delta t} + L^{+}{}_{x} C^{k} + L^{+}{}_{y} C^{k} = 0; \qquad (6.49)$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C^{n+1}_{i,j} - C^{k}_{i,j}}{\Delta t} + L^{-}{}_{x} C^{n+1} + L^{-}{}_{y} C^{n+1} = 0. \qquad (6.50)$$

Для чисельного розв’язку рівняння (6.47) використовується явна різницева схема [99]:

$$C^{n+1}_{i,j} = C^{n}_{i,j} + \triangle t \frac{C^{n}_{i+1,j} - 2C^{n}_{i,j} + C^{n}_{i,j}}{\Delta x^{2}} \mu_{x} + \\ + \triangle t \frac{C^{n}_{i,\mathrm{j}+1} - 2C^{n}_{i,j} + C^{n}_{i,j-1}}{\Delta y^{2}} \mu_{y}. \qquad (5.51)$$

Для чисельного розв’язку рівняння (6.48) використовується метод Ейлера [100].

Здійснена програмна реалізація побудованої чисельної моделі. Для програмування була використана мова програмування FORTRAN.

На базі розробленої чисельної моделі створено код Wa3BG, мова програмування – FORTRAN**.** Код має такі складові:

– Wa02.DAT – файл початкових даних;

– WaW3 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку поля потенціалу швидкості в області дослідження;

– WaW32 – підпрограма типу SUBROUTINE для визначення значення поля швидкості повітря в області дослідження;

– WaW3K – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку рівняння теплопереносу;

– W2W3 – підпрограма SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні рівняння конвективного переносу тепла;

– W1aK – підпрограма типу SUBROUTINE для розв’язання рівняння переносу крапель води;

– WW3K – підпрограма SUBROUTINE для реалізації граничних умов при розв’язанні рівняння переносу крапель води;

– WW35 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку розрахованого поля температури в області дослідження.

Алгоритм розв’язання задачі такий:

1. У файл початкових даних вводиться інформація щодо розташування об’єктів на території небезпеки (наприклад, територія АЗС), місце пожежі тощо.

2. Вводиться інформація щодо розташування місця створення водяної завіси на території.

3. Здійснюється чисельний розв’язок рівняння для потенціалу швидкості.

4. Визначається поле швидкості потоку повітря в області дослідження.

5. Розраховується поле температури в області дослідження.

6. Здійснюється друк поля температури в робочій зоні.

7. Розраховується концентрація крапель води в області дослідження.

8. Розраховується процес охолодження повітря внаслідок випарювання крапель води.

9. Здійснюється друк поля температури в робочій зоні.

Вихідні дані для моделювання:

1. Дані щодо об’єктів на території небезпеки, їх геометрична форма.

2. Розміри розрахункової області.

3. Розміри різницевої сітки.

4. Швидкість та напрям вітру.

5. Місце пожежі.

6. Температура повітря на місці пожежі.

7. Координати місця подачі води.

8. Розрахунковий крок за часом.

9. Кількість кроків за часом.

10. Інтенсивність подачі води.

11. Діаметр крапель води.

Нижче наведено результати розв’язання модельної задачі на базі розробленої чисельної моделі та створеного комп’ютерного коду. Розглядається пожежа на території АЗС. Подача води здійснюється у двох місцях біля будівлі на території АЗС. На рис. 6.26 показана схема розрахункової області.

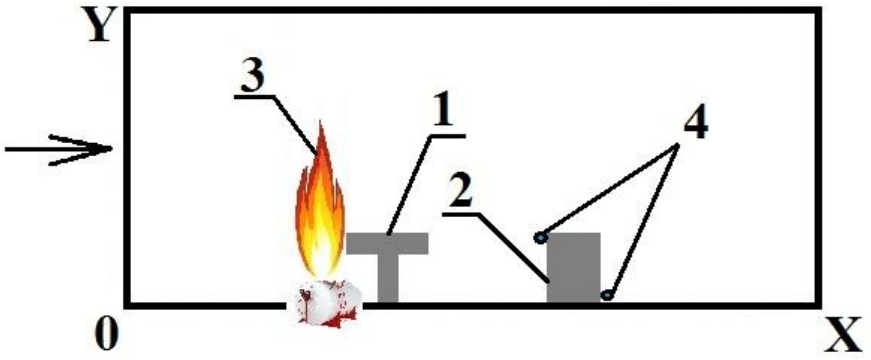


Рисунок 6.26 – Схема розрахункової області:
1 – місце заправки; 2 – будівля; 3 – полум’я; 4 – місце подачі води.

Розрахунок виконувався за таких даних: температура повітря на місці пожежі 1100^0C; швидкість повітря 5,3 м/с; розміри розрахункової області

100 м х 30 м; подача води 3000 крапель/с; діаметр крапель 10^{-4} м; густина повітря 1,2 кг/м^3; питома теплоємність 1076 Дж/кг·град.

На рисунках показано поле температури в розрахунковій області для певного часу. Зауважимо, що число 0 відповідає фоновій температурі 20 ^{0}C. Кожне число показує температуру, у відсотках, від максимальної температури $T = 1100^{\circ} C$ + фонова температура 20 ^{0}C .

Якщо проаналізувати поле температури на рис. 6.27 (немає водяної завіси), то ми бачимо, що за будівлею температура повітря змінюється від 42 ^{0}C до 273 ^{0}C.

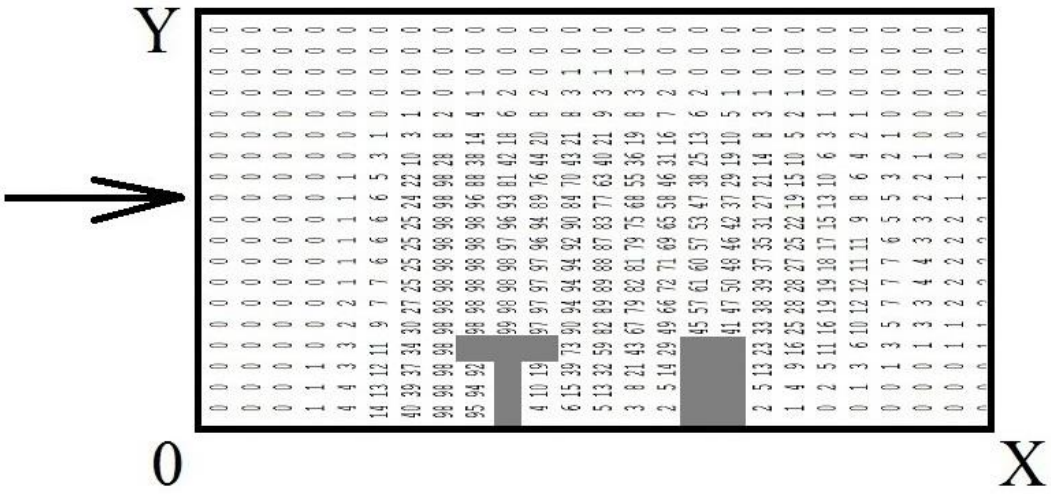


Рисунок 6.27 – Зона теплового забруднення (немає водяної завіси), *t*=12 с

Далі показано зону теплового забруднення повітря за умови використання водяної завіси.

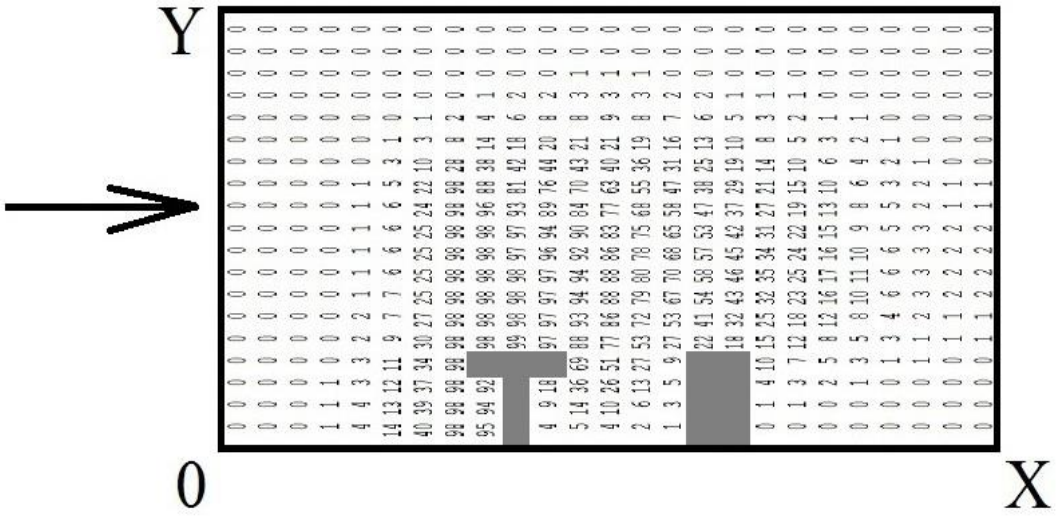


Рисунок 6.28 – Зона теплового забруднення (є водяна завіса), *t*=12 с

Якщо проаналізувати поле температури на рис.6.28 (є водяна завіса), то ми бачимо, що за будівлею температура повітря варіюється від 20 ^{0}C до 31^{0}C. Таким чином, ми бачимо, що використання водяної завіси дозволяє суттєво зменшити температуру в зоні інтересу.

Зауважимо, що час розрахунку становив 6 с.

6.4 Моделювання процесу самонагрівання насипу палива в сховищі

Сучасним трендом в галузі енергетики є перехід від газу (дуже дорогого паливу на сьогодні) до палива рослинного походження. Таким паливом є, зокрема, торф (рис. 6.29). Пожежна небезпека при експлуатації енергетичних об’єктів, що використовують торф, полягає в можливості самозаймання цього виду палива. Тому на енергетичному об’єкті, де зберігається, використовується торф, виникає ризик виникнення пожежі в сховищі внаслідок самонагрівання насипу цього палива. Причиною цього є мікробіологічні процеси, що відбуваються в сировині.

Рисунок 6.29 – Торф

(фото: https://blog.bio-grunt.ru/kakuju-polzu-i-vred-mozhet-prinesti-torf-na-ogorode.html)

Тепло, що виділяється в одній з частин сировини, накопичується внаслідок її малої теплопровідності. З досягненням певної температури виникає пожежа. Тому значний науковий інтерес мають задачі, розв’язання яких спрямовано на прогнозування процесу самонагрівання сировини з метою визначення часу можливої пожежі у сховищі.

Для розв’язання цієї задачі було побудовано математичну модель. На рис. 6.30 показано схему розрахункової області: є насип сировини, відомі теплофізичні параметри цього середовища.

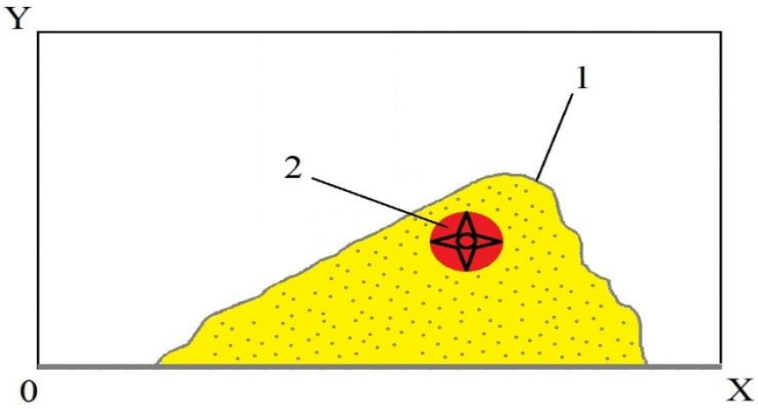


Рисунок 6.30 – Схема розрахункової області:

1 – межа насипу; 2 – «вогнище».

При побудові математичної моделі враховується:

1. Складна геометрична форма насипу сировини.

2. Нерівномірність коефіцієнта теплопровідності в «тілі» насипу.

3. Можливість задавання будь-якого місця появи нагріву сировини в «тілі» насипу.

Для моделювання поля температури в насипу речовини використовується таке рівняння теплопровідності [16, 33]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum \frac{Q_i}{\rho_k c_k} \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(\text{y} - y_i), \quad (6.52)$$

де T – температура в насипу;

t – час; a_x – коефіцієнти температуропровідності;

Q_i – інтенсивність i-го джерела емісії тепла в насипу;

$\rho_{k,} c_k$ – густина та теплоємність k-го шару сировини;

$\delta(x - x_i), \delta(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака, що показує координати x_i, y_i місця розташування джерела емісії тепла в насипу.

Таким чином, це рівняння теплопровідності враховує, що область дослідження складається з різних шарів, які мають різні теплофізичні параметри. Наприклад, за наявності двох різних шарів коефіцієнти температуропровідності визначаються так:

$$a_1 = \frac{k_1}{\rho_1 \cdot c_1},$$

$$a_2 = \frac{k_2}{\rho_2 \cdot c_2},$$

де k_1, k_2 – коефіцієнти теплопровідності кожного шару.

Для побудови чисельного розв'язку рівняння (6.52) використовується прямокутна різницева сітка. Форма насипу моделюється за допомогою маркерів, тобто виділяється набір різницевих комірок, що «відповідають» межі насипу. На цій межі задається гранична умова першого роду, тобто *T*=const, що характеризує температуру навколишнього середовища в місці, де розташований насип (приймається *T*=20 ^{0}C). На нижній межі розрахункової області наявна гранична умова «теплоізольована стінка». Початкова умова: при *t*=0 всередині насипу приймається *T*=20 ^{0}C.

Для чисельного розв'язання використовується така різницева схема розщеплення [100]:

$$\frac{T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^{n}}{\Delta t} = a_x \cdot \left[\frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + a_y \cdot \left[\frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] + \frac{\sum Q_k}{2} \delta_i$$

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = a_x \cdot \left[\frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + a_y \cdot \left[\frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right] + \frac{\sum Q_k}{2} \delta_i,$$

де параметр $\delta_i = 1$, якщо в різницевій комірці є джерело емісії тепла, та $\delta_i = 0$ – якщо ні.

На базі побудованої чисельної моделі виконано обчислювальний експеримент. Схема розрахункової області показана на рис. 6.27. Насип має складну геометричну форму. Розрахунок здійснювався за таких даних: довжина насипу 19 м, максимальна висота насипу 2,3 м; джерело емісії розташоване на висоті 1.4 м; розміри розрахункової області 28 м х 4,9 м; коефіцієнт теплопровідності середовища 0,09 Вт/м/град;

$\rho \cdot c = 8.5 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}}$; $Q = 60 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$. «Вогнище», що емітує тепло, має розміри 1,1 м × 0,2 м [83].

Нижче на рисунках показано поле температури в насипу для різних моментів часу. Кожне число показує значення температури у відсотках від максимальної температури $T_{\text{макс}}$ у «вогнищі», що розташовано в насипу. Положенню «вогнища» відповідає число 99.

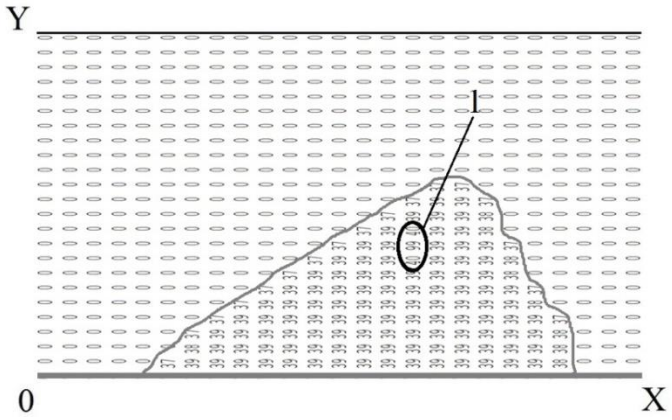


Рисунок 6.31 – Поле температури в насипу, *t*=1,12 діб:
1 – зона впливу «вогнища», $T_{\text{макс}} = 50^0 C$.

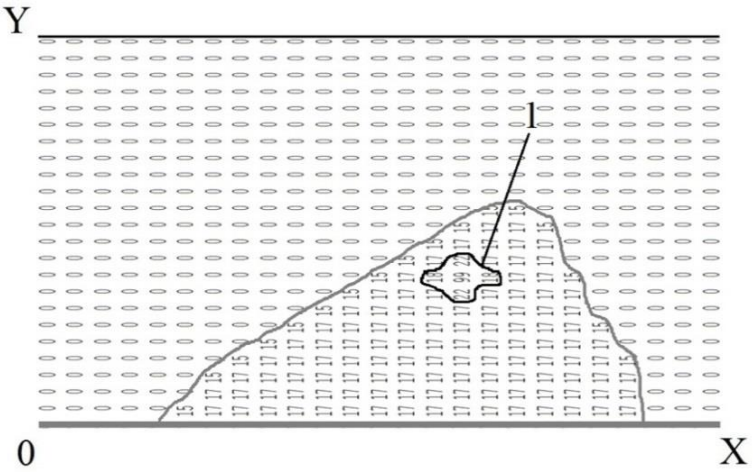


Рисунок 6.32 – Поле температури в насипу, *t*=3,29 діб:
1 – зона впливу «вогнища», $T_{\text{макс}} = 111^0 C$.

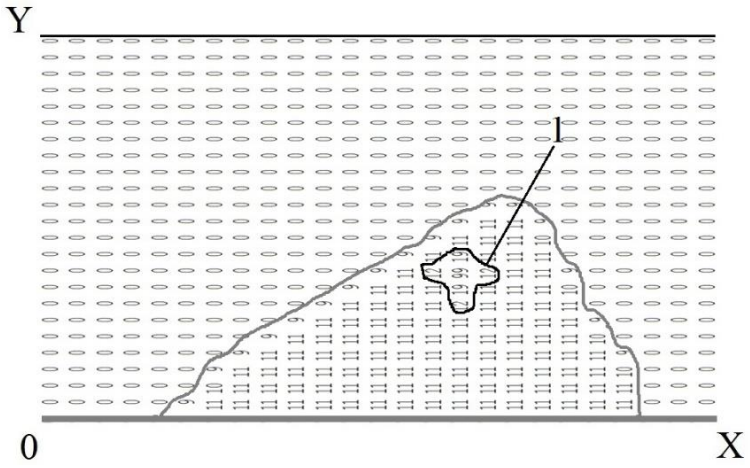


Рисунок 6.33 – Поле температури в насипу, *t*=5,49 діб:

1 – зона впливу «вогнища», $T_{\text{макс}} = 172^0 C$.

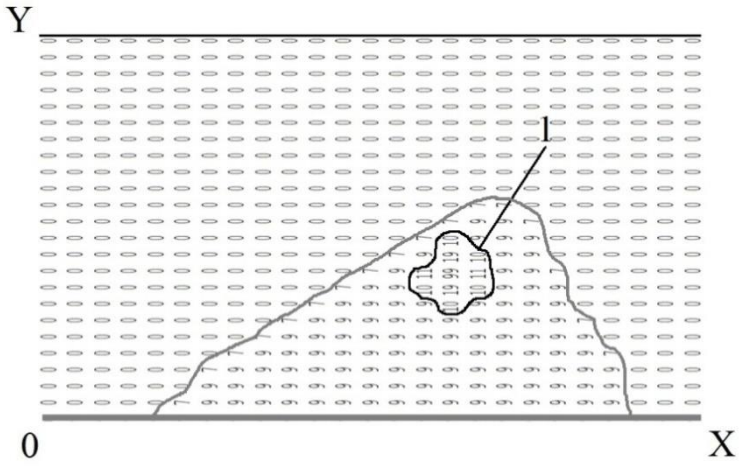


Рисунок 6.34 – Поле температури у насипу, *t*=6,59 діб:

1 – зона впливу «вогнища», $T_{\text{макс}} = 203^0 C$.

Як можна бачити з наведених рисунків, у насипу йде активний процес зростання температури, що значно підвищує ризик виникнення пожежі. Зона впливу «вогнища» в насипу збільшується в розмірах з часом.

На практиці для прогнозування ризику виникнення пожежі потрібно визначити час, коли температура середовища у «вогнищі» досягне значення займання. На рисунку нижче показано, як змінюється температура середовища у «вогнищі».

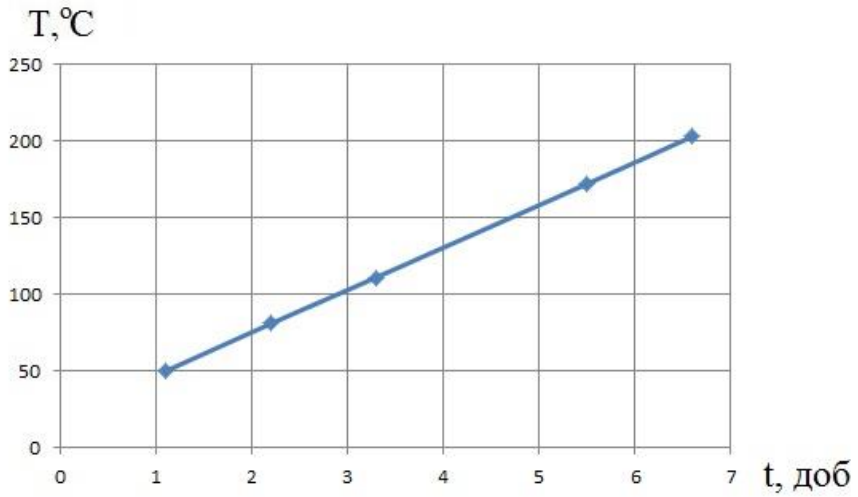


Рисунок 6.35 – Зміна з часом температури середовища у «вогнищі»

Якщо прийняти, що займання починається при температурі середовища порядку 65 ^{0}C, то з рис. 6.35 можна бачити, що ймовірний час займання дорівнює приблизно 1.05 доби.

Час розрахунку становить 7 с.

Нижче на рисунках показані результати розв’язання іншої модельної задачі. Розглядається «точкове» джерело займання в насипу, що також має складну геометричну форму. Моделювання виконувалося за таких параметрів: довжина насипу 24 м, максимальна висота насипу 6.4 м; джерело займання розташоване на висоті 3.8 м; коефіцієнт температуропровідності середовища $a_x = a_y = 0.12 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2/\text{с}$; $Q = 280 \cdot 10^2\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$. «Вогнище», що емітує тепло, показано на рис. 6.36 маркером 99. Початкова температура середовища в насипі 20 ^{0}C.

Маркери на рис. 6.36 – 6.38 показують значення температури у відсотках від максимальної температури $T_{\text{макс}}$ у «вогнищі», що розташоване в насипу.

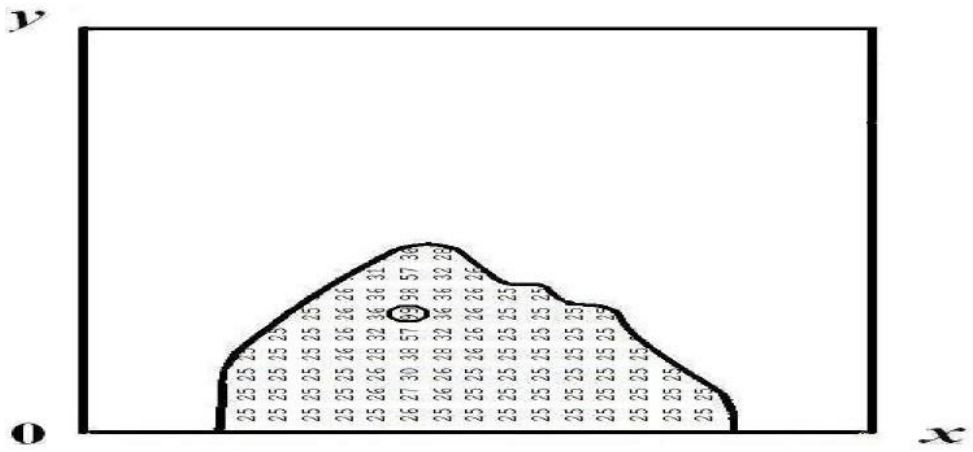


Рисунок 6.36 – Поле температури в насипу, t=0.52 діб ($T_{макс}$ =770 ^{0}C)

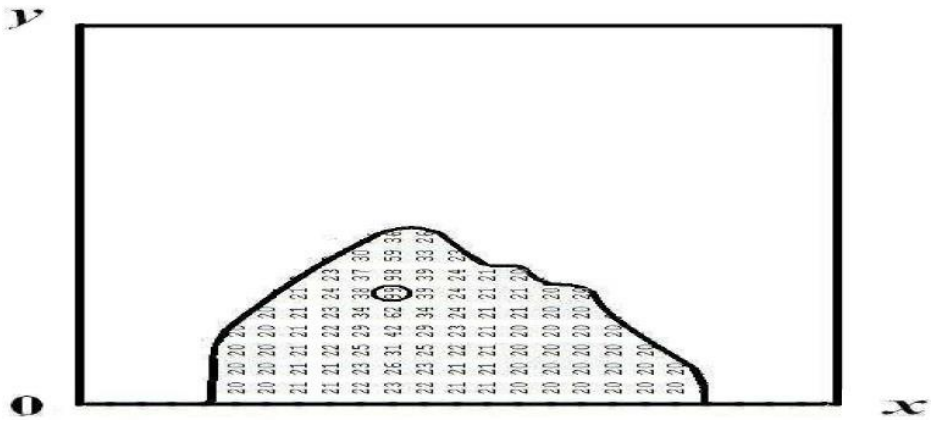


Рисунок 6.37 – Поле температури в насипу, t=1.04 діб ($T_{макс}$ =940 ^{0}C)

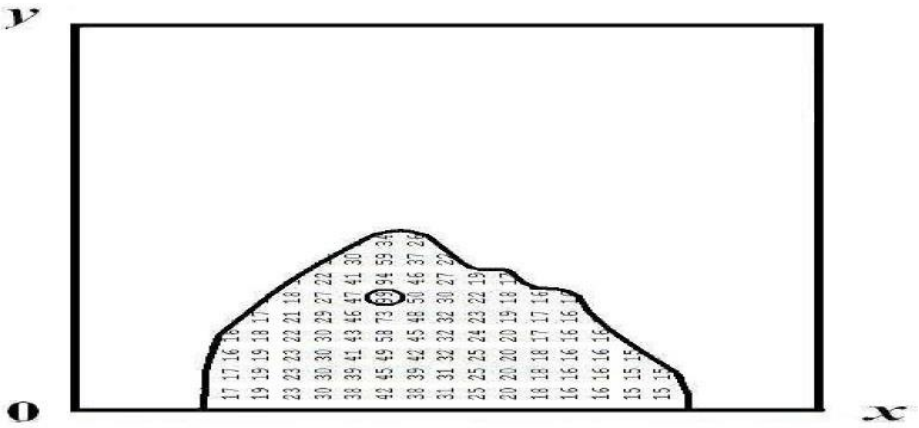


Рисунок 6.38 – Поле температури в насипу, t=6.94 діб ($T_{макс}$ =1250 ^{0}C)

Як можна бачити з наведених рисунків, у насипу відбувається активний процес зростання температури, що значно підвищує ризик виникнення пожежі.

На рис. 6.39 результати розв’язання цієї модельної задачі, але у випадку, коли в насипу розташовано два «точкових» джерела займання.

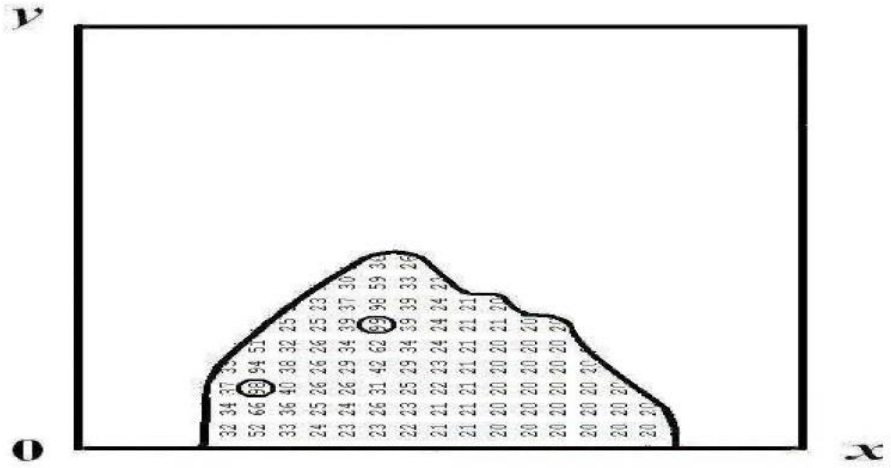


Рисунок 6.39 – Поле температури в насипу, t=1.04 діб ($T_{макс}$ = 940 ^{0}C)

Як можна бачити з наведених результатів моделювання, розроблена чисельна модель дає можливість швидко прогнозувати ризик виникнення пожежі в сховищі. У ході моделювання враховуються найбільш суттєві фактори, що впливають на розвиток теплових полів у насипу сировини.

Висновки до розділу 6

1. Розроблено комплекс чисельних моделей для оцінювання ризику термічного ураження людей у випадку пожежі. Запропоновані моделі базуються на використанні рівняння енергії та рівняння руху повітряних мас, що дозволило створити на їх базі комп’ютерні коди, що мають широкий робочий діапазон.

2. Моделі дозволяють швидко здійснювати аналіз закономірностей формування областей теплового забруднення робочих зон та оцінювання ризику термічного ураження працівників з урахуванням впливу різного роду перешкод, що впливають на формування зон теплового забруднення, а значить, на формування зон ризику термічного ураження працівників.

3. Розроблені чисельні моделі дозволяють здійснювати оцінювання ризику термічного ураження працівників всередині будинків у разі припливу в них нагрітого повітря та поширення цього повітря в робочих приміщеннях.

4. Розроблено ефективну чисельну модель, що дає можливість оцінити ефективність використання водяної завіси для захисту працівників від термічного ураження у випадку пожежі.

5. На базі розроблених чисельних моделей виконано обчислювальні експерименти з оцінювання зон ризику термічного ураження працівників під час ймовірних пожеж на реальних об’єктах м. Дніпро. Результати цих експериментів показують, що побудовані чисельні моделі дають можливість оперативно розв’язувати складні, багатофакторні задачі.

6. Розроблено чисельну модель для оцінювання ризику виникнення пожежі в сховищі внаслідок самонагрівання. Модель базується на використанні рівняння енергії для опису розподілу температури в області можливого горіння. Чисельна модель враховує найбільш суттєві фактори, що впливають на розвиток теплових полів у насипу. Виконані розрахунки підтверджують широкий робочий діапазон розробленої моделі.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науковою працею, у якій розв’язано важливу науково-прикладну проблему: виконано наукове та практичне обґрунтування оцінки рівня небезпеки в робочих зонах на території об’єктів паливно-енергетичного комплексу та визначення ефективності застосування засобів захисту з урахуванням моделювання процесів та використання спеціальних інженерних рішень. Наукові результати здійснених досліджень такі:

1. Аналіз шкідливих факторів, що спостерігаються під час функціонування об’єктів паливно-енергетичного комплексу та існуючих захисних систем, довів доцільність створення багатофункціональних динамічних моделей аналізу рівня небезпеки в робочих зонах при штатному функціонуванні та у випадку екстремальних ситуацій на об’єктах.

2. На підставі системного аналізу наукових праць встановлено, що зараз за кордоном для оцінювання рівня небезпеки в робочих зонах найбільш активно застосовуються чисельні моделі, що дозволяють отримати детальнішу інформацію про розподіл факторів небезпеки та здійснити аналіз ефективності різних засобів, що використовуються на виробництві для забезпечення нормальних умов праці. Водночас в Україні є дефіцит таких моделей, отже, існує потреба в їхній активній розробці.

3. Розроблено динамічну чисельну модель для оцінювання ефективності водяної завіси, що використовується для зменшення впливу теплових потоків на працівників у разі виникнення пожежі. Модель дозволяє комплексно врахувати вплив вітру, дифузії, швидкості випарювання крапель, наявності будівель у зоні пожежі на зниження рівня теплового забруднення повітря біля місця пожежі. Ця модель може бути використана для наукового обґрунтування місця розташування завіси та її параметрів.

4. Розроблено інженерний метод розрахунку процесу «захоплення» краплею води часток пилу під час поширення крапель води в пиловій хмарі.

Цей метод дозволяє врахувати рух краплі в повітрі, розміри краплі, а також розміри та вагу часток пилу. Це дає можливість адекватно оцінювати ефективність використання водяної завіси для зменшення рівня пилового забруднення робочих зон.

5. Розроблено динамічну чисельну модель для оцінювання ефективності зволоження поверхні штабеля вугілля з метою зменшення пилоутворення від його поверхні. Модель враховує інтенсивність подавання води на поверхню штабеля, метеоумови, нерівномірність випарювання води з різних ділянок штабеля, його геометричну форму та дозволяє регулювати режим подавання води на поверхню штабеля вугілля з метою забезпечення комфортних умов праці на майданчиках, де є склади вугілля.

6. Розроблено динамічну чисельну модель для оцінювання ефективності подачі води в пилову хмару, що формується біля штабеля вугілля. Модель дозволяє комплексно враховувати геометричну форму пилової хмари, геометричну форму штабеля, динаміку процесу «захоплення» пилу краплями води, метеоумови. Модель може бути використана для розробки стратегії керування рівнем пилового забруднення в робочих зонах шляхом раціонального вибору параметрів струменевих установок, що подають воду в пилову хмару.

7. Розроблено чисельну модель для оцінювання ефективності використання шумозахисних екранів біля залізничної колії. Модель враховує складну геометричну форму екранів, рельєф залізничного насипу, геометричну форму рухомого складу. Ця модель може бути використана для обґрунтування параметрів шумозахисних екранів для забезпечення допустимого рівня шуму в робочих зонах біля залізничної колії.

8. Виконано експериментальні дослідження, які підтвердили, що використання запропонованих спеціальних захисних екранів, що встановлюються біля штабеля вугілля, дозволяє зменшити рівень пилового забруднення в робочих зонах у 6-11 разів. Розроблено багатофакторні чисельні моделі для визначення ефективності використання таких екранів

шляхом виконання обчислювального експерименту. Ці моделі враховують геометричну форму штабеля вугілля, метеоумови, геометричну форму захисного екрана та його локацію відносно штабеля.

9. Здійснено дослідження з визначення ефективності використання бар'єрів спеціальної форми, а також бар'єрів, що мають «TX Active» поверхню та розташовуються біля автодоріг з метою зниження рівня хімічного забруднення робочих зон. Розроблено комплекс багатофакторних чисельних моделей, що дозволяють дослідити закономірності формування областей забруднення в робочих зонах при використанні таких бар'єрів, визначити їхню ефективність та здійснити наукове обґрунтування під час вибору параметрів цих захисних засобів. Результати виконаних досліджень показали, що використання бар'єрів спеціальної форми дозволяє зменшити рівень хімічного забруднення повітря в робочих зонах більш ніж у два рази порівняно з бар'єрами традиційної форми. Використання бар'єрів, що мають «TX Active» поверхню, дозволяє зменшити рівень забруднення повітря в робочих зонах у 5 разів.

10. Побудовано багатопараметричні чисельні моделі для оцінювання ефективності запропонованого комплексного використання вентиляторів, бар'єрів та екранів для зниження рівня хімічного забруднення повітря в робочих зонах біля автодоріг. Моделі дають можливість швидко визначати рівень забруднення повітря в робочих зонах з урахуванням геометричної форми бар'єрів, екранів, положення вентилятора та його витрати, розташування авто. Виконані дослідження показали, що при комплексному використанні цих засобів рівень забруднення повітря може бути на 80 % нижчим порівняно з використанням лише захисних бар'єрів.

11. Виконано експериментальні дослідження з визначення ефективності використання екранів складної геометричної форми та спеціальних бортів, що розташовуються на вагонах, які здійснюють транспортування вугілля, з метою зниження рівня пилового забруднення робочих зон біля залізничної колії. Результати виконаних досліджень

показали, що використання спеціальних бортів дозволяє зменшити рівень пилового забруднення робочих зон більш ніж у 2 рази, а використання спеціальних екранів – у 6 разів. Розроблено чисельні моделі, що дозволяють здійснювати дослідження з оцінювання ефективності використання спеціальних бортів та екранів шляхом виконання обчислювального експерименту.

12. Побудовано багатопараметричні чисельні моделі для оцінювання рівня забруднення повітря на промисловому майданчику ТЕС за несприятливих метеоумов. Моделі дають можливість швидко визначати рівень небезпеки для працівників у разі інверсії та штилю. Результати виконаних досліджень показали, що концентрація SO_2 в умовах інверсії на промисловому майданчику Придніпровської ТЕС може перевищувати ГДК майже в 17 разів, а при штилі концентрація вугільного пилу біля штабеля вугілля перевищує ГДК майже в 10–12 разів.

13. Побудовано багатопараметричну чисельну модель для оцінювання пилового забруднення повітря всередині авто, що рухається територією ТЕС. Модель дає можливість швидко визначати рівень небезпеки для працівників, які працюють на транспортних засобах, що рухаються на промислових майданчиках об’єктів паливно-енергетичного комплексу. Модель враховує внутрішню геометрію кабіни авто, положення працівників, режим вентиляції салону авто, інтенсивність потрапляння пилу в салон.

14. Розроблено метод розв’язання двох пов’язаних задач, що виникають у разі пожежі на об’єктах паливно-енергетичного комплексу: визначення закономірностей формування зон теплового забруднення повітря в робочих приміщеннях у разі припливу в них зовнішнього нагрітого повітря та розрахунку нагрівання конструкцій споруд під час їх взаємодії з потоком нагрітого повітря. Метод дозволяє врахувати температуру повітря на місці пожежі, геометричну форму будівель, що розташовані поблизу осередку пожежі, метеоумови, теплофізичні параметри конструкцій, а також

оперативно визначити ризик термічного ураження працівників на відкритій місцевості, у робочих приміщеннях та час руйнування споруди.

15. Розроблено динамічну багатопараметричну чисельну модель самонагрівання твердого палива в сховищах. Модель дозволяє врахувати теплофізичні параметри палива, геометричну форму штабеля, локацію джерела самонагрівання, температуру навколишнього середовища в сховищі. Ця модель дозволяє прогнозувати ризик виникнення пожежі в сховищах та оцінити час її виникнення.

16. Розроблено багатофакторні чисельні моделі для оцінювання ризику термічного або хімічного ураження водолазів під час виконання ремонтних робіт на пошкоджених підводних трубопроводах. Моделі дозволяють визначити зони можливого ураження з урахуванням гідродинаміки течії водного потоку, інтенсивності емісії нагрітої води, емісії хімічно небезпечної речовини з пошкодженого підводного трубопроводу, геометричну форму підводної траншеї, де розташовано трубопровід.

17. Здійснено верифікацію розроблених чисельних моделей, що підтвердило їх адекватність.

18. На основі виконаних досліджень розроблено науково-методичний інструментарій прогнозування формування шкідливих факторів у робочих зонах та оцінювання ефективності застосування заходів захисту на підприємствах паливно-енергетичного комплексу України.

19. Розроблені чисельні моделі та створене на їхній базі програмне забезпечення впроваджені в Державній службі України з надзвичайних ситуацій в Дніпропетровській області та в навчальному процесі ДНВЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е., Тарасенко А.А. Моделирование пожаров, их обнаружения локализации и тушения. Харьков : НУГЗУ, 2011. 927 с.

2. Аварія з фосфором у Львівській області: факти, проблеми, екологічні наслідки / Е. В. Соботович, Г. В. Лисиченко, Ю. Л. Забулонов та ін. *Вісн. Ін-ту геохімії навколишнього середовища.* 2007. Вип. 14. С. 8–18.

3. Авраменко М.И. О $k-\varepsilon$ модели турбулентности. – Снежинск : РФЯЦ-ВНИИТФ, 2005. 76 с.

4. Антошкина Л. И., Беляев Н. Н., Гунько Е. Ю. Оценка экологического риска при авариях с химически опасными веществами. Днепропетровск : Наука и образование, 2008. 136 с.

5. Аргучинцев В. К., Аргучинцев А. В. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал. Иркутск : Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2007. 255 с.

6. Баранік В. С., Книш О. І. Сучасні шумозахисні конструкції пасивної дії. *Матеріали ІІІ Всеукраїнської науково –практичної конференції «Перспективни технології для забезпечення безпеки життєдіяльності та довголіття людини»*, 6 -7 травня 2021 р., Одеса. Одеса, 2021. С. 54 – 59.

7. Басманов А. Е., Говаленков С. С. Оценка концентрации опасных химических веществ в воздухе при непрерывной активности источника. *Зб. наук. пр. «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. 2010. Вип. 12. С. 21–27.

8. Басманов А. Е., Михайлюк А. А., Кулик Я. С. Математическая модель нагрева теплового датчика под тепловым воздействием пожара разлива нефтепродукта. *Проблемы пожарной безопасности*. 2012. Вып. 32, С.21 – 25.

9. Беликов А. С., Рагимов С. Ю., Акиньшин В. Д. Некоторые аспекты оптимизации исследования условий труда по микроклимату в промышленной индустрии. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*. 2010. Вип. 52, Ч. 2. С. 3–9.

10. Беликов А. С., Беляев Н. Н., Беляева В. В., Берлов А. В. Оценка уровня пылевого загрязнения рабочих зон методом математического моделирования. *Геотехнічна механіка.* 2020. № 152. С. 218–225. https://doi.org/10.15407/geotm2020.152.218

11. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. Москва : Металлургия, 1988. 256 с.

12. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Беляева В. В., Берлов А. В. Локальная защита атмосферы от загрязнения. *Збірник наукових праць НГУ*. 2018. № 56. С. 223–231.

13. Беляев Н. Н., Беляева В. В., Берлов А. В., Гунько Е. Ю., Козачина В. А. Математическое моделирование аварийных ситуаций на химически опасных объектах. *Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України:* матеріали V всеукр. наук.-практ. конф., 30 квітня 2019 р. Київ, 2019. С. 20–21.

14. Беляев Н.Н., Оладипо М.О., Кириченко П.С. Защита окружающей среды при транспортировке угля. Кривой Рог : Изд.: Р.А. Козлов, 2018.92 с.

15. Беляев Н. Н., Русакова Т. И., Кириченко П. С. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха выбромаси автотранспорта на улицах городов. Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. 159 с.

16. Беляева В. В. Математическое моделирование процесса самонагревания насыпи растительного сырья. *Вісник Дніпропетровського університету*. Серія «Механіка». 2014. № 5. Вип. 18, т. 1. С. 12–16.

17. Беляева В. В., Якубовская З. Н. Оценка уровня загрязнения атмосферы при авариях. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист:* матеріали VII всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, 20–21 жовтня 2017 р. Черкаси, 2017. С. 109.

18. Беляева В. В., Долина Л. Ф., Заика А. А., Дорога О. Г. Математическое моделирование загрязнения атмосферы промышленными выбросами. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем:* матеріали IV міжнар. наук.-техн. конф., 1–2 листопада 2018 р. Дніпро, 2018. С. 39.

19. Беляева В. В., Берлов А. В., Гунько Е. Ю. Компьютерное моделирование загрязнения воздушной среды в рабочих зонах. *Комп'терне моделювання та оптимізація складних систем:* VI міжнар. наук.-техн. конф., 4-6 листопада 2020 р. Дніпро, 2020. С. 21–22.

20. Беляева В. В., Берлов А. В., Машихина П. Б. CFD моделирование в прикладних задачах. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур:* IX всеукр. наук. семінар, 20-21 жовтня 2020 р. Харків, 2020. С. 17-18.

21. Беляева В. В., Берлов А. В., Вовк В. В., Горбунов Ю. А., Горохов А. И. Моделирование экстремальных ситуаций на транспорте. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств:* тези 9-ї міжнар. наук.-практ. конф., 26-27 листопада 2020 р. Дніпро, 2020. С. 13–14.

22. Беляева В. В., Новоселец И. С., Берлов А. В. Оценка загрязнения воздушной среды методом компьютерного моделирования. *Priority Directions of Science and Technology Development*, 22 -24 November 2020. Kyiv, 2020. С. 307–308.

23. Беляева В. В., Патенко А., Берлов А. В. Компьютерное моделирование чрезвычайних ситуаций на транспорте и опасных производствах. *Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, промисловості та освіти*: тези міжнар. наук.-практ. конф., 15-16 грудня 2020 р. Дніпро, 2020. С. 166–167.

24. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Калашніков І. В. Математичне моделювання затікання токсичного газу у приміщення при аварії на промисловому майданчику. *Математичне моделювання*. 2018. № 2 (39). С. 95–101.

25. Біляєв М. М., Берлов О. В., Калашніков І. В., Біляєва В. В. Моделювання затікання токсичного газу у приміщення. *Науковий вісник будівництва.* 2019. № 1 (95). С. 227–232.

26. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Чередниченко Л. А. Оцінка ризику термічного ураження у випадку аварійного горіння. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* 2020. № 6. С. 54–60.

27. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Калашніков І. В. Аварійне горіння твердого ракетного палива: оцінка ризику ураження людей в робочому приміщенні. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2020. Вип. 3 (87). С. 22–29.

28. Біляєв М.М., Берлов О.В. Засіб захисту навколишнього середовища при імпульсній емісії токсичних речовин на залізничному транспорті. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. №11. С. 86–92.

29. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Чередніченко Л. А., Оладіпо Мутіу Олатойе. Ризик-орієнтовані моделі для рішення задач прогнозування ураження людей при виникненні надзвичайних ситуацій. *Безпека життєдіяльності в XXI столітті:* VIII міжнар. наук.-практ. конф., 19-20 листопада 2020 р. Дніпро, 2020. С. 19–20.

30. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Якубовська З. М. Комп'ютерне моделювання в задачах оцінювання наслідків екстремальних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*: VII міжнар. наук.-техн. конф., 3-5 листопада 2021 р. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2021. С. 15–16.

31. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Якубовська З. М. Оцінювання наслідків екстремальних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах методом математичного моделювання. *Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно*

небезпечних об'єктах: матеріали всеукр. наук.-практ. інтернет-конф., 2-3 листопада 2021 р. Харків : ХНАДУ, 2021. С. 195–197.

32. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Вергун О. О. Моделювання роботи водяної завіси для захисту працівників від термічного ураження. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 2. С. 28–36.

33. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А. Чисельне моделювання процесу самонагрівання насипу рослинної сировини з метою визначення часу пожежі. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 6. С. 7–13.

34. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Русакова Т. І. Екстремальні ситуації на транспорті – моделі для оцінювання ризику ураження персоналу. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств*: міжнар. наук.-практ. конф., 25-26 листопада 2021 р. Дніпро, 2021. С. 16.

35. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Вергун О. О., Якубовська З. М. Компьютерне моделювання та пакети програм для експрес оцінювання наслідків аварійних ситуацій. *Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті:* тези XV міжнар. наук.-практ. конф., 16–17 грудня 2021 р. Дніпро, 2021. С. 57.

36. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В. Математичне моделювання наслідків нестаціонарних викидів. *Теоретико-практичні проблеми використання математичних методів і комп'ютерно-орієнтованих технологій в освіті та науці*: зб. матеріалів III всеукр. конф., 28 квітня 2021 р. Київ, 2021. С. 149–150.

37. Біляєв М. М., Калашніков І. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Берлов О. В. Математичне моделювання в задачах оцінки ризику на потенційно небезпечних об'єктах: Монографія. Дніпро: Журфонд, 2021. 270 с.

38. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD Моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях: монографія. Дніпро: Журфонд, 2022. 268 с.

39. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Русакова Т. І. Чисельне моделювання забруднення повітря біля автошляху із захиснимі бар'єрами. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 2. С. 7–14.

40. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Краснюк А. В., Цуркан В. В. Чисельне моделювання забруднення повітря на промисловому майданчику під час штилю. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 4. С. 7–12.

41. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В. Математичне моделювання наслідків екстремальних ситуацій на промислових об'єктах. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні*: міжнар. наук.-техн. конф., 16-18 березня 2020 р. Дніпро, 2020. С. 107–109.

42. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Козачина В. А. Чисельні моделі для експрес оцінювання ризику ураження при аварійних ситуаціях. *Trends and Prospects Development of Science and Practice in Modern Environment:* X internat. science conf., November 22–24, 2021. Geneva, 2021. С. 326–327.

43. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Русакова Т. І, Берлов О. В., Козачина В. А. Використання математичних моделей в задачах оцінювання наслідків екстремальних ситуацій на промислових об'єктах. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні*: тези доп. XIII міжнар. наук.-техн. конф., 16-18 березня 2022 р. Дніпро : НМетАУ, 2022. С. 99–100.

44. Біляєва В. В. Математичне моделювання теплового забруднення поверхневих вод. *Геотехнічна механіка*. 2012. Вип. 101. С. 295–301.

45. Біляєва В. В. Використання математичних моделей для оцінювання рівня теплового та хімічного забруднення робочих зон. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 3. С. 39–45.

46. Біляєва В. В., Берлов О. В. Пакет програм «WORK-SAFE2» для моделювання забруднення робочих зон при екстремальних ситуаціях. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи*: матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф., 26 березня 2021 р. Львів, 2021. С. 5–6.

47. Біляєва В. В., Гунько О. Ю., Машихіна П. Б. Чисельне моделювання в задачах охорони праці та екологічної безпеки. *Modern Challenges to Science and Practice:* III internat. scientific and pract. conf., january 24–26, 2022. Varna, Bulgaria, 2022. С. 551–552.

48. Біляєва В. В., Гунько О. Ю., Машихіна П. Б. Оцінювання ризику ураження персоналу та забруднення навколишнього середовища методом математичного моделювання. *Actual Problems of Practice and Science and Methods of its Solution*: IV internat. science conf., january 31 – february 02, 2022. Milan, Italy, 2022. P. 626.

49. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1985. 273 с.

50. Бруяцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. 443 с.

51. Бочковський А. П., Сапожнікова Н. Ю. Розробка автоматизованої системи мінімізації професійних ризиків. *Екологічна безпека та збалансоване природокористування.* 2018. № 1 (17). С. 57–65.

52. Букі О. О., Квітковський Ю. В. Захист населення і територій від екологічної небезпеки в залежності від розташування джерел хімічних надзвичайних ситуацій. *Науковий вісник будівництва.* 2014. № 3 (77). С. 211–214.

53. Виноградов А.Г. Развитие научных основ систем защиты работников от мощных тепловых излучений водяными завесами : *дис. д-ра наук*. Черкассы, 2017. 360 с.

54. Виноградов А. Г. Моделювання процесу формування водяної завіси за допомогою програмного комплексу FlowVision. *Пожежна безпека: теорія і практика:* зб. наук. пр. 2010. № 6. С. 19-25.

55. Воробйов Є. О., Ніколенко М. О., Худякова І. О. Запобігання забруднення повітря пилом під час транспортування вугілля. *Вісті АДІ ДВНЗ «ДонНТУ»*. Горлівка, 2005. № 1. С. 34–38.

56. Глива В. А., Березуцький В. В., Березуцька Н. Л., Халіль В. В. Аудит ризіків безпеки на робочому місці. *Технологічний аудит та резерви виробництва.* 2016. № 2/3 (28). С. 12–17.

57. Голинько В. И., Дранишников Л. В., Стоецкий В. Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера. *Науковий вісн. Нац. гірнич. ун-ту.* 2014. № 3. С. 117–123.

58. Голінько В.І., Лебедєв Я.Я., Литвиненко А.А., Муха О.А. Аерологія гірничих підпріемств. Дніпро : НГУ, 2015, 206с.

59. Гуліда Е.М., Меньшикова О.В., Ренкас А.А. Моделювання пожежі в закритому приміщенні. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2012. Вип. 22.6. С. 307-317.

60. Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости. Москва : Наука, 1979. 536 с.

61. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. Москва: Наука, 2007. 268 с.

62. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Тихонов С. І. Сучасні технології обслуговування, ремонту та реконструкції підводних газонафтопроводів. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2014. № 1(36). С. 118 – 130.

63. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. Москва : Стройиздат, 1990. 420 с.

64. ДСТУ IEC/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (IEC/ISO 31010:2009, IDT). [Чинний від 2014-07-01]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 80 с.

65. Дударев В.В., Горовых О.Г., Бардушко С.Н., Шмулевцов И.А., Бобрышева С.Н. Влияние дисперсности распылённой воды на интенсивность её подачи при тушении пожара в закрытом объёме. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2009. № 1 (19). С.149–157.

66. Євдокименко М. Ф., Францев Є. В., Бондар М. В., Курінова М. К. Моніторинг та прогнозстану атмосферного повітря під час проведення масових вибухів у залізорудних кар'єрах Кривбасу. *Гірничий вісник*. 2016. Вип. 101. С. 28–32.

67. Запорожець О. І. Проект концепції управління ризиками надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. *Безпека життєдіяльності.* 2007. № 4. С. 2–4.

68. Запорожець О. І., Сукач С. В., Галаган О. Г., Козловська Т. Ф. Визначення параметрів оптимальної комфортності у робочої зоні приміщення за показниками повітряного середовища. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. Вип. 1/2017 (102). С. 17–21.

69. Захматов В. Д. Техногенна аварія у Львівській області. *Безпека життєдіяльності.* 2007. № 8. С. 13–14.

70. Здановський В. Г, Гогіташвілі Г. Г., Степанишин В. М. Нове у системі управління охороною праці на основі системного підходу та імплементації євро стандартів. *Проблеми охорони праці в Україні* : зб. наук. пр. Київ : ДУ «ННДІПБОП», 2016. № 31. С. 3–11.

71. Іконнікова Н. А., Юрченко А. А., Іконніков М. Ю. Экспериментальные исследования коэффициента захвата железорудной пыли каплями воды при ее орошении. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету.* 2018. № 54. С. 363–377.

72. Калашніков І. В. Науково-методологічний інструментарій оцінки теріторіального ризику на хімічно небезпечних обєктах : дис. … д-ра техн. наук. Дніпро, 2021. 313 с.

73. Колесник В. Е., Юрченко А. А., Литвиненнко А. А., Павлюченко А. В. Способы и средства повышения экологической безопасности массовых взрывов в железнорудных карьерах по пылевому фактору. Днепропетровск : Литогаф, 2014. 112 с.

74. Кошик Ю. Й. Розробка технології боротьби з пилом при перевезенні гірничої маси залізничним транспортом : автореф. дис. … канд. техн. наук. Кривий Ріг, 2003. 20 с.

75. Лапшин О. Є., Гурін А. О., Лапшин О. О., Радіоненко Б. М. Підвищення ефективності управління охороною праці на підприємстві у гірництві. *Гірничий вісник*. 2014. Вип. 98. С. 169–174.

76. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Москва : Наука, 1978. 735 с.

77. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 320 с.

78. Мацак В. Г., Хоцянов В. Г. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве. Москва : Медгиз, 1959. 231 с.

79. Методика оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру. Постанова Кабінету Міністрів України від 04.06.2003 р. № 862. Київ, 2003. 23 с.

80. Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. Київ, 2001. 33 с.

81. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об’єктів підвищеної небезпеки. Наказ № 637 від 04.12.2002 / Міністерство праці та соціальної політики України. 25 с.

82. Методи розрахунку концентрації повітряних забруднень на міській території: навч. посібник / Є. Р. Абрамовський, Ю. Л. Гринчишин, Є. В. Єгоров, О. А. Загній. Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2010. 223 с.

83. Моделирование пожаров и взрывов / под общ. ред. Н. Н.

Брушлинского и А. Я. Корольченко. Москва : «Пожнаука», 482 с.

84. Мягков М. С., Алексеева Л. И. Особенности ветрового режима типовых форм городской застройки. *Архитектура и современные информационные технологии (AMIT)*. 2014. Вып. 1. №. 26. С. 1-15.

85. Настанова з розрахунку та проектування від шуму сельбішних територій. ДСТУ-НБВ. 1.1-33:2013. Київ : Мінрегіон України, 2014. 42 с.

86. Нуянзін О. М., Поздєєв С. В., Сідней С. О., Некора О. В. Аналіз існуючих математичних моделей тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2014. № 18. С. 93-101.

87. Оценка техногенного риска при емісії опасных веществ на железнодорожном транспорте : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. С. Кириченко, Л. Я. Мунтян. Кривой Рог : Изд. Р.А. Козлов, 2017.126 с.

88. Пляцук Л. Д., Бойко В. В. Аналіз методів математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. *Вісник КНУ ім. Михайла Остроградського*. 2010. Вип. 6. С. 1–4.

89. Полянин А. Д., Вязмин А. В., Журов А. И., Казенин Д. А. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса. Москва : Факториал, 1998. 368 с.

90. Прищепов, О. Ф., Левицька О. С. Особливості розсіювання шкідливих речовин викидів автотранспорту у повітрі в умовах міста. *Наукові праці*: *наук.-метод. журнал. Техногенна безпека*. 2009. Вип. 111. №. 98. С. 139-146.

91. Проблемы экологии массовых взрывов в карьерах / Э. И. Ефремов, П. В. Бересневич, В. Д. Петренко и др.; под ред. Э. И. Ефремова. Днепропетровск: Сечь, 1996. 196 с.

92. Проблеми промислової безпеки та охорони праці у паливно-енергетичному комплексі України: монографія / В. Г. Здановський, В. А. Глива, Я. О. Ляшок, С. В. Покопаєв, І. В. Іорданов. Покровськ : ДВНЗ «ДонНТУ», 2017. 344 с.

93. Про схвалення Концепції реформування системи управління охороною праці в Україні та затвердження плану заходів щодо її реалізації. Ропорядження Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2018 р. № 989-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/989-2018-%D1%80#Text (Дата звернення: 17.01.2022).

94. Противопожарная водяная завеса. Режим доступа: http://www.bikoms.ru/dictionary/p/protivopozharnaja-vodjanaja-zavesa/(Дата звернення: 17.01.2022).

95. Пшинько А. Н., Беляев Н. Н., Машихина П. Б. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях. Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2011. 166 с.

96. Русакова Т.І. Розвиток наукових основ та практичної оцінки шкідливих факторів в робочих зонах на теріторії промислових підприємств : дис. д-ра техн. наук. Дніпро, 2019. 367 с.

97. Рудаков Д. В. Модель рассеивания примеси в приземном слое атмосферы над поверхностью со сложным рельєфом. *Вісник ДНУ*. Сер.: Механіка. Вип. 8. 2004. № 6, т. 1. С. 89–97.

98. Рогаль П., Кондратюк В. До теорії прогнозування наслідків аварії: зони планування та зони реагування. *Безпека життєдіяльності*. 2008. № 1–2. С. 28–30.

99. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Москва : Мир, 1980. 616 с.

100. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.

101. Серебреніков Е. В. Розробка методики визначення концентрації пилу на ділянках робочих зон кар’єрів при перевантаженні гірничої маси: автореф. дис. канд. техн. наук. Кривий Ріг, 2010. 20 с.

102. Светличная С. Д. Оценка полученной токсодозы при распространении первичного облака токсического вещества. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2011. Вип. 13. С. 127–132.

103. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: Мир-1980 – 549с.

104. Совершенствование системы управления производством и охраной труда / Бунько Т. В., Шевченко В. Г., Ященко И. А., Кокоулин И. Е. *Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. пр*. 2016. Вип. 127. С. 3–17.

105. Сукач С. В. Дослідження температурно-вологісного режиму приміщення під час роботи вентиляційного комплексу. *Системи обробки інформації: збірник наукових праць*. 2016. Вип. 9 (146). С. 197–202.

106. Степаненко С. Н., Волошин В. Г., Типцов С. В. Решение уравнения турбулентной диффузии для стационарного точечного источника. *Український гідрометеорологічний журн.* 2008. № 3. С. 13–24.

107. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. Москва : Мир, 1980. 539 с.

108. Ущільнення вугля у вагоні Режим доступа: https://www.miningmx.com/news/energy/37050-afrimat-pressing-ahead-with-due-diligence-ahead-of-r2-15bn-swoop-on-universal-coal/ (Дата звернення: 17.01.2022).

109. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. Київ : Наук. думка, 1997. 368 с.

110. Шмандий В.М. Научно-методические принципы исследования состояний техногоннной безопасности в регионе. *Вісник КДПУ*. 2002. Вип. 5(16). С. 19–24.

111. Шналь Т.М., Поздєєв С.В., Яковчук Р.С., Некора О.В., Сідней С.О. Математичне моделювання розвитку пожежі у триповерховій житловій будівлі при проведенні у ній повномасштабних огневих випробувань. *Пожежна безпека*. 2020. № 36. С. 121 – 130. DOI: 10.32447/20786662.36.2020.14

112. Шналь Т. М., Синенько І. П., Стасюк М. І. Характеристика моделей розвитку пожеж. URL: 252 Lviv Polytechnic National University Institutional Repository. http://ena.lp.edu.ua

113. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств. 3-е изд., перераб. Москва : Химия, 1980. 288 с.

114. Юрченко А.А. Исследование коэффициента захвата аэрозольных частиц каплями воды при орошении. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2012. № 39. С. 187-194. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpngu_2012_39_28

115. A comparison of contaminant plume statistics from a Gaussian puff and urban CFD model for two large cities / Julie Pulen, Jay p. Boris, Theodore Young, Gopal Patnaik, John Iselin. *Atmospheric Environment*. 39 (2005). 1049–1068.

116. ALOHA. Instruction Manual. US Environmental Protection Agency, 1999. 149 p.

117. Anthony Michael Barret. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequences ana Countermeasure Coast Effectiveness: A Dissertation / Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University. Pittsburgh, Pensylvania, 2009. 122 p.

118. Anthony Michael Barret, Peter J. Adams. Chlorine Track Attack Consequence and Mitigation. *Risk Analysis*. 2011. Vol. 31, 8. P. 1243–1259.

119. Beeldens A. & Cassar L. & Murata Y. Applications of TiO_2 photocatalysis for air purification. In: Ohama Y. & Van Gemert D. (Eds.). *Application of Titanium Dioxide Photocatalysis to Construction Materials* (1 st ed.). Springer. 2011.

120. Blocken B. & Persoon J. Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2009. Vol. 97. No. 5-6. P. 255-270.

121. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Oladipo M. O. Numerical analysis of atmosphere pollution from coal train. East European Scientific Journal 3(43): 2019, 10-15.

122. Biliaiev M., Kozhachyna V, Biliaieva V., Mutiu Olatoye Oladipo, Chernyatyeva K. Modeling of the atmosphere pollution from coal trains. MATEC Web of Conferences 294, 02007 (2019), EOT-2019.

123. Biliaiev M., Biliaieva V., Berlov O., Kozachyna V., Kirichenko P., Oladipo M.O., Poltoratska V. Modeling coal dust dispersion from pile with protection barriers. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 168. P. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202016800021.

124. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Kalashnikov I. Numerical simulation of toxic chemical transport after accidental release at chemical plant. *Romanian Journal of Information Science and Technology*. 2020. Vol. 23, N S. P. S3–S13.

125. Biliaiev M. M., Biliaieva V. V., Kozachyna V. A., Berlov O. V., Oladipo M. O., Kirichenko P. S. Reducing of coal dust release from train wagon with barrier. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 985 (2020) 012018, p. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/985/1/012018.

126. Biliaiev M. M., Kirichenko P. S., Kozachyna V. A., Berlov O. V., Poltoratska V. M., Yakubovska Z. M. Simulation of environmental pollution from diesel locomotive. *Problems of the railway transport mechanics, safety of motion, dynamics, strength of rolling stock and energy saving*: abstracts of XV internat. conf., october 22–23, 2020. Dnipro, 2020. P. 123.

127. Biliaiev M., Kozachyna V, Biliaieva V., Rusakova T., Berlov O., Mala Y. Constructing a method for assessing the effectiveness of using protective barriers near highways to decrease the level of air pollution. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 6/10 (114). P. 30–39.

128. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Applic-ation of local exhaust systems to reduce pollution concentration near the

road. *Transport Problems*. 2020. Vol. 15, issue 4, part 1. P. 137–148. DOI: 10.21307/tp-2020-055.

129. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Computing model for simulation of the pollution dispersion near the road with solid barriers. *Transport Problems*. 2021. Vol. 16, issue 2. P. 73–86. DOI: 10.21307/tp-2021-024.

130. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Mathematical modeling of aeroion mode in a car. *Transport Problems*. 2022. Vol. 17, issue 2. P. 19–32. DOI: 10.21307/tp-2020-055.

131. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Oladipo M. Road with fan for reducing exposure to traffic emissions. *Proceedings of 25th International Scientific Conference.* Transport Means 2021, October 6-8, Part II, Kaunas, Lithuania. P. 638–643.

132. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Gunko O., Rusakova T. Numerical model for evaluation efficiency of coal pile wetting. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* Vol. 970 (012037). DOI: 10.1088/1755-1315/970/1/012037

133. Biliaieva V. V., Kirichenko P. S., Berlov O. V., Gabrinets V. O., Horiachkin V. M. Computer modeling of air pollution in case of dust cloud movement in open pit mine. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2019. № 4 (82). С. 18–25.

134. Biliaieva V. V., Kirichenko P. S., Gunko E. Y., Bondarenko I. O., Mashykhina P. B., Yakubovska Z. M. Computer Simulation of Dead-End Mine Working Ventilation. *Science and Transport Progress*. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2019. № 5 (83). С. 26–35.

135. Berkowicz R. 2000b. A simple model for urban background pollution. Environmental Monitoring and Assessment. *Solutions and Facts*. 2014. Vol. 65. P. 259–267.

136. Bhowmick T., Bandopadhyay S., Ghosh T. Three-dimensional CFD modeling approach to approximate air pollution conditions in high-latitude open-pit mines. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2015. Vol. 168. P. 741 – 753

137. Bolibrukh B.V., Chmiel M., Mazur Yu. A Model of a Firefighter's Thermal Condition when Attired in Protective Clothing. *Bezpieczenstwo I Technika Pozarnicza*. Jozefow : Kwartalnik CNBOP-PIB, 2016. № 1. С. 37–47.

138. Bisleshana Brahma Prakash. Development of Emission Factors (EFs) Model for Coal Train Loading Operations. 2016. Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. DOI: https://doi.org/10.33915/etd.6448

139. Brantley, Halley L. Hagler, Gayle S.W. Deshmukh, Parikshit J. and Baldauf, Richard W Field Assessment of the effects of Roadside Vegetation on Near Road Black Carbon and Particulate Matter. 2014. U.S. Environmental Protection Agency Papers. 240. URL: http://digitalcommons.unl.edu/usepapapers?utm_source=digitalcommons.unl.edu%2Fusepapapers%2F240&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages (Accessed: 17.01.2022)

140. Bruno L. & Fransos,D. & Lo Giudice A. Solid barriers for windblown sand mitigation: Aerodynamic behavior and conceptual design guidelines. *Journal of Wind Engineering & Industrial Dynamics.* 2018. No. 173. P. 79-90.

141. Byshov, N.V. & Bachurin, A.N. & Bogdanchikov, I.Y. & Oleynik, D.O. Method and device for reducing the toxicity of diesel engine exhaust gases. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018. Vol. 7. No. 4. P. 920-928.

142. Chen, W., Dong, Z. Wind Tunnel Test on the Influence of moisture on the Erodibility of loessial loam soil by wind. Journal of Arid Environments. 1996. 34. P. 391-402

143. Coal Dust Management Plan South West System. November 2013. P. 48.

144. Daly A. & Zannetti Paolo & Jennings M. Accident reconstruction and plume modeling of an unplanned ammonia release. *Air Pollution*. 2013. 174. P. 3 – 13. 10.2495/AIR130011.

145. Deborah M. S. Madalozzo, Alexandre L. Braun and Armando M. Awruch. A numerical model for pollutant dispersion simulation in canyons. *Mecanica Computacional*. Vol. XXXI. P. 211–235 (articulo complete).

146. Development of building resolving atmospheric CFD code taking into account atmospheric radiation in complex geometric / Y. Qu, M. Millez, L. Musson-Genon, B. Carrissimo. *Conf. Abstracts of 31st NATO* / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application, 27 September–01 October, 2010, Torino, Italy. Torino, 2010. № P.1.5.

147. Diego I., Pelegry A., Torno S., Torano J., Menendez M. Simultaneous CFD evaluation of wind flow and dust emission in open storage piles. Applied Mathematical Modelling. 2009. 33. P. 3197 – 3207.

148. Dispersion Modeling of Hydrogen Sulfide at Cimarex Rands Butte Project Using ALOHA. Bureau of Land Management Pinedale Field Office.SWCA Environmental Consultants 1043 Coffeen Avenue, Suite D Sheridan, Wyoming 82801. January 2010. 26 p. URL: www.swca.com (Accessed: 17.01.2022)

149. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place II: Residental Districts / Wanyu R. Chan, William W. Nazaroff, Phillip N. Price, Ashok J. Gadgil. *Atmospheric Environment.* 2007. Vol. 41, iss.33. P. 7082–7085.

150. Fabian Probst. Prediction of Sound Pressure Levels at Workplaces. Coustician, Sound: Template for EAA proceedings, Euronoise Prague 2012.

151. Ferreira A. D., Viegas D. X., Sousa A.C.M. Full-scale measurements for evaluation of coal dust release from train wagons with two different shelter covers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2003. Vol. 91(10). P.1271-1283.

152. Ferreira A.D., Vaz P. A. Wind tunnel study of coal dust release from train wagons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2004. 92. P. 565–577.

153. Gian Luca Guerrini, KU Leuven Environmental benefits of innovative photocatalytic cementitious road materials. *Conference Paper*, July 2012. 14 p.

154. Gopal Patnaik, Jay Boris. Fast3D-CT: an LES model for urban aerodynamics. *The fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*, Chapel Hill, North Carolina, USA May 23-27, 2010.

155. Hadipour M., Pourebrahim S. and Mahmmud A. R. Mathematical modeling considering air pollution of transportation: an urban environmental planning, case study in Petaling Jaya, Malaysia. // Bell M. C. and Blake M. Forecasting the Pattern of Urban Growth with PUP: a Web-based Model Interfaced with GIS and 3D Animation. *Journal of Environment and Urban Systems*. 2000. 24(6). 559-581//pp.75-92.

156. Hagler Gayle S.W. et al. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment.* 2011. Vol. 45, Is. 15. P. 2522-2530. https://doi.org /10.1016/j.atmosenv.2011.02.030

157. Hanna S. Air Quality Modelling over. Short Distances. *College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling.* 16 May–3 June, 1994. № SMR/760–2. P. 712–743.

158. Heist D. et al. Estimating near-road pollutant dispersion: A model inter-comparison. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2013. Vol. 25. P. 93-105.

159. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software, Quality of Life, 9, 2018. P. 38-45.

160. Ingo During, Matthias Ketzel, Wolfgang Baechlin, etc. A new simplified NO/NO_2 conversion model under consideration of direct NO_{2-} emissions. *Meteorologische Zeightschrift*.2011. Vol.20, № 1 February, 067 -073. P. 67 – 73.

161. János T., Gorliczay E., Borbély J. Atmospheric spreading model for ammonia released from the poultry house. *Analele Universităţii din Oradea, Fascicula: Ecotoxicologie, Zootehnie si Tehnologii de Industrie Alimentara.* 2016. Vol. XV/B Anul15. P. 331–338.

162. Jane Berger. Dispersion and emission modeling of traffic induced road dust. *Series of dissertations submitted to the Faculty of Mathematics and Natural Sciences*. University of Oslo. 2017, No. 973. P.1-66.

163. Janhäll S. Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*. 2015. No. 105. P. 130–137.

164. Klingberg J. & et al. Mapping leaf area of urban greenery using aerial LiDAR and ground-based measurements in Gothenburg, Sweden. *Urban Forestry and Urban Greening.* 2017. Vol. 26. P. 31-40.

165. Leurent F. & Li S. & Badia H. Structural design of a hierarchical urban transit network integrating modal choice and environmental impacts. *Transportation Research Procedia.* 2019. Vol. 37. P. 99-106.

166. Maoa Y. & Wilsona J. D. & Kortb J. Effects of a shelterbelt on road dust dispersion. *Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 79. P. 590-598. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv. 2013.07.015

167. Maria de Lurdes Dinis, Antonia Fluza. Simulation of liberation and dispersion of radon from a waste disposal. *Advances in Air Pollution Modeling for Environment Security. NATO Science Series*. Springer. 2004. Vol. 54. P.133–142.

168. Matthieu Horgnies, Florence Serre, Isabelle Dubois-Brugger, Ellis Gartner. NOx De-pollution Using Activated Charcoal Concrete – From Laboratory Experiments to Tests with Prototype Garages. *Proceedings of the 4th International Conference on Environmental Pollution and Remediation, Prague, Czech Republic, August 11-13.* 2014 Paper No. P. 65, 65-1, 65-8.

169. Merah A., Noureddine A. Modeling and Analysis of NO_x and O_3 in a Street Canyon. *Der Pharma Chemica*. 2017. No. 9 (19). P. 66–72.

170. Michal Kisa, Ludovit Jelemensky and Jan Stopka. CFD modeling for emergency preparedness and response to liquefied ammonia release. *IChemE SYMPOSIUM SERIES*. 2016, NO. 153. P. 1–8.

171. Moccia L. & Giallombardo G. & Laporte G. Models for technology choice in a transit corridor with elastic demand. *Transportation Research Part B: Methodological.* 2017. Vol. 104. P. 733-756.

172. Nakayama H., Jurcakova K., Nagai H. Large-Eddy Simulation of plume dispersion within various actual urban areas. *Advances in Science & Research*. 2013. 10. P. 33–41.

173. Nils Brolin. Product Development of Curved Noise and NOx Barrier. *Master of Science Thesis*. Stockholm, Sweden, 2010. 51 p.

174. NR2C New Road Construction Concepts. Towards reliable, green, safe&smart and human infrastructure in Europe, April 2008. URL: http://www.fehrl.org/nr2c(Accessed: 17.01.2022).

175. Numerical simulation of gas dispersion during cold venting of natural gas pipelines / Ning Liao et al. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol.10(2). P. 1-14.

176. Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlavka, Jan Bitta. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The science for population protection*. 2015. 2. P.1–8.

177. Overman H. T. Simulation model for NO_x distribution in a street canyon with air purifying pavement. *University Twente, Netherlands*. 2009. Master thesis. P. 1–99.

178. Samarskii A. A., Gulin A. V. *Numerical methods*. Moscow : Nauka, 1989.P. 432.

179. Sang Jin Jeong. A CFD Study of Road Barrier Impact on the Dispersion of Road Air Pollution. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2015. Vol.9-1. P. 22 -30.

180. Sassykova R. & et al. The main components of vehicle exhaust gases and their effective catalytic neutralization. *Oriental Journal of Chemistry*. 2019. Vol. 35. No. 1. P. 110-127.

181. Spalart P.R. Strategies for turbulence modeling and simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. UK: Elsevier, 2000. Vol. 21. P. 252-263.

182. Spatial Heterogeneity of Roadway Pollutant in Los Angeles / Wonsik C., Shishan Hu, Meilu He, Kozawa K. URL: http://www.aqmd.gov/docs/default-

source/technologyresearch/TechnologyForums/near-road-mitigationmeasures/near_road_mitigation-agenda-presentations.pdf (Last accessed: 16.12.2018)

183. State Enterprise «SRIBC» *DSTU-N B V.1.1-33: 2013 Instruction on calculation and design of inhabited territories protection from the noise*. Kyiv : Minrehion, 2013. P. 46.

184. Sukach S., Kozlovs'ka T., Serhiienko I., Khodakovskyy O., Liashok I., Kipko O. Studying and substantiation of the method for normalization of air-ionic regime at industrial premises at the ultrasonic ionization of air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 4/10 (94). P. 36–45.

185. Sumanth Chinthala Particle Dispersion within a Deep Open Cast Coal Mine. URL: https://www.researchgate.net/publication/274364974

186. Suzanne Oudwater. Modeling of Dust Emission in Dimension Stone Quarry. Aalto University, School of Engineering, Espoo. 2017. 88 p.

187. The Computational Modeling of Baffle Configuration in the Primary Sedimentation Tanks / M. Shahrokhi, F. Rostami, Md Azlin Md Said, Syafalni. *2nd International Conference on Environmental Science and Technology*. Singapore, 2011. Vol. 6. P. 392–396.

188. Tripathy D. P., Dash T. R., Badu A., Kanungo R. Assessment and Modelling of Dust Concentration in Open Cast Coal Mine in India. *Global Nest Journal*. 2015. Vol. 17, № 4. P.825 – 834.

189. Torno S., Rodriguez R., Allende C., Toraño J. Dust emission reduction for open storage mineral piles by fences: CFD modelling. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2010. Vol 136. P.121 – 128.

190. Tseng J. M., Su T. S., Kuo C. Y. Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. *Procedia Engineering*. 2012. 45. P. 384–392.

191. Venkatram A. & Snyder M. & Isakov V. & Kimbrough S. Impact of wind direction on near-road pollutant concentrations. *Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 80. P. 248-258

192. Vishal Chauhan. Optimization of Parameters to Improve Ventilation in Underground Mine Working using CFD. National Institute of Technology, Rourkela-769008. 2013-2014. P. 57.

193. Wastberg B. S. & et al. How to visualize the invisible simulating air pollution dispersions in a 3D city model // *13th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management.* At Utrecht, Netherlands, Vol. Proceedings for CUPUM. 2013. P. 1-4.

194. Werner K. Graber, Fritz Gassmann. Real time modelling as an emergency decision support system for accidental release of air pollutants. *Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM)* / Paul Scherrer Institute, CH-5232 Villigen-PSI, Switzerland. 2000. Vol. 52, iss. 5. P. 413–426.

195. Wind tunnel test of gaseous diffusion in street canyon with thermal stratification / R. Ooka, S. Murakami, S. Iizuka, K. Vehara. Wind Engineering into the 21th century. A.A. Balkena / Rotterdam, 1999. Vol.2. P.781-786.

196. Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar and Naser Moharram Nejad. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modelling. *Environmental Communication, Biosci. Biotech. Res. Comm.* 2017. 10 (1). P. 192–204.

197. Zhong J. & Cai X. & Bloss W. Modelling the dispersion and transport of reactive pollutants in a deep urban street canyon. *Environmental Pollution*. 2015. Vol. 200. P. 42-52.

ДОДАТОК А
ВІДОМОСТІ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Начальник Головного управління
ДСНС України у Дніпропетровській області
генерал-майор служби цивільного захисту
_____ А.А.Кульбач
«23» 10 2020 р.

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи

В дисертації Біляєвої Вікторії Віталіївні (Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара) розроблено комплекс CFD моделей та комп'ютерних програми для розрахунку зон ураження персоналу у випадку аварій на потенційно небезпечних об'єктах. Розроблені моделі дозволяють шляхом обчислювального експерименту оперативно визначати ризик хімічного, термічного та радіоактивного ураження персоналу при різноманітних сценаріях аварійних ситуацій.

Розроблені моделі базуються на чисельному інтегруванні 3D, 2D рівнянь аеродинаміки та тепломасопереносу, що дозволяє визначити поля надлишкових температур та концентрації небезпечних речовин в атмосферному повітрі робочих зон. Автором розроблені чисельні моделі, що дозволяють розраховувати ризик ураження персоналу та рівень пошкодження різноманітних об'єктів при руху ударної хвилі. Чисельне інтегрування рівнянь моделей здійснюється за допомогою різницевих схем.

Використання розроблених CFD моделей та створених на їх базі програм дає можливість науково обґрунтовано визначити динаміку хімічного, радіоактивного та теплового забруднення при екстремальних ситуаціях різного типу, наприклад: пожежа на АЗС, емісія небезпечних речовин при горінні палива, вибух тощо.

Розроблені автором CFD моделі та пакети програм використовуються в Головному управлінні ДСНС у Дніпропетровській області для оцінки наслідків екстремальних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах регіону та транспорті.

Заступник начальника Головного
управління з реагування на НС
полковник служби цивільного захисту _____ О.В. Шевченко

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. ректора ДВНЗ «ПДАБА»
д.н. з держ. упр., професор
Галина ЄВСЄЄВА
«__» _____ 2022 р.

АКТ

Про впровадження результатів дисертаційного дослідження здобувача кафедри безпеки життєдіяльності ДНВЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Біляєвої Вікторії Віталіївни на тему: «Наукові основи оцінки шкідливих факторів та захисту працівників на об'єктах паливно-енергетичного комплексу» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.26.01 – охорона праці.

Комісія у складі:

голова – начальник навчального відділу ДНВЗ «ПДАБА» Ігор Грабовський;

члени комісії: професор кафедри безпеки життєдіяльності, д.т.н. Микола Налисько; доцент кафедри безпеки життєдіяльності, к.т.н. Володимир Шаломов; доцент кафедри безпеки життєдіяльності, к.т.н. Олександр Берлов,

цим актом засвідчує, що матеріали дисертаційної роботи Біляєвої В. В. використовуються при підготовці бакалаврів та магістрів зі спеціальностей 263 – Цивільна безпека та 192 – Будівництво та цивільна інженерія при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін «Охорона праці та цивільний захист», «Пожежна профілактика», «Безпека при ліквідації надзвичайних ситуацій». В навчальному процесі використовуються розроблені Біляєвою В. В. математичні моделі та комп'ютерні програми визначення зон хімічного та термічного забруднення при екстремальних ситуаціях на промислових об'єктах.

Комплекс комп'ютерних програм, розроблений Біляєвою В. В. також використовується при виконанні магістерських дипломних робіт. Даний комплекс програм використовується для моделювання нестаціонарних процесів хімічного та термічного забруднення повітря в робочих зонах.

Голова
Начальник навчального відділу ДНВЗ «ПДАБА» Ігор ГРАБОВСЬКИЙ

Члени комісії
д.т.н., професор Микола Налисько
к.т.н., доцент Володимир Шаломов
к.т.н., доцент Олександр Берлов

ДОДАТОК Б
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Біляєва В. В. Математичне моделювання теплового забруднення поверхневих вод. *Геотехнічна механіка*. 2012. Вип. 101. С. 295–301.

2. Беляева В. В. Математическое моделирование процесса самонагревания насыпи растительного сырья. *Вісник Дніпропетровського університету*. Серія «Механіка». 2014. № 5. Вип. 18, т. 1. С. 12–16.

3. Беляев Н. Н., Калашников И. В., Беляева В. В., Берлов А. В. Локальная защита атмосферы от загрязнения. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2018. № 56. С. 223–231.

4. Biliaieva V. V., Kirichenko P. S., Berlov O. V., Gabrinets V. O., Horiachkin V. M. Computer modeling of air pollution in case of dust cloud movement in open pit mine. *Science and transport progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport.* 2019. № 4 (82). С. 18–25.

5. Biliaieva V. V., Kirichenko P. S., Gunko E. Y., Bondarenko I. O., Mashykhina P. B., Yakubovska Z. M. Computer simulation of dead-end mine working ventilation. *Science and transport progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2019. № 5 (83). С. 26–35.

6. Біляєв М. М., Берлов О. В., Калашніков І. В., Біляєва В. В. Моделювання затікання токсичного газу у приміщення. *Науковий вісник будівництва.* 2019. № 1 (95). С. 227–232.

7. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Чередниченко Л. А. Оцінка ризику термічного ураження у випадку аварійного горіння. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* 2020. № 6. С. 54–60.

8. Беликов А. С., Беляев Н. Н., Беляева В. В., Берлов А. В. Оценка уровня пылевого загрязнения рабочих зон методом математического моделирования. *Геотехнічна механіка.* 2020. № 152. С. 218–225.

9. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Калашніков І. В. Аварійне горіння твердого ракетного палива: оцінка ризику ураження людей в робочому приміщенні. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2020. Вип. 3 (87). С. 22–29.

10. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Вергун О. О. Моделювання роботи водяної завіси для захисту працівників від термічного ураження. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 2. С. 28–35.

11. Біляєва В. В. Використання математичних моделей для оцінювання рівня теплового та хімічного забруднення робочих зон. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 3. С. 39–45.

12. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А. Чисельне моделювання процесу самонагрівання насипу рослинної сировини з метою визначення часу початку пожежі. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 6. С. 7–13.

13. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Русакова Т. І. Чисельне моделювання забруднення повітря біля автошляху із захиснимі бар’єрами. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 2. С. 7–14.

14. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Краснюк А. В., Цуркан В. В. Чисельне моделювання забруднення повітря на промисловому майданчику під час штилю. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 4. С. 7–12.

15. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Kalashnikov I. Numerical simulation of toxic chemical transport after accidental release at chemical plant. *Romanian journal of information science and technology*. 2020.

Vol. 23. N S. P. S3–S13 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Web of Science, квартиль Q3).*

16. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Application of local exhaust systems to reduce pollution concentration near the road. *Transport problems*. 2020. Vol. 15, issue 4, part 1. P. 137–148. DOI: 10.21307/tp-2020-055 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, квартиль Q3).*

17. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Computing model for simulation of the pollution dispersion near the road with solid barriers. *Transport problems*. 2021. Vol. 16, issue 2. P. 73–86. DOI: 10.21307/tp-2021-024 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, квартиль Q3).*

18. Biliaiev M., Kozachyna V, Biliaieva V., Rusakova T., Berlov O., Mala Y. Constructing a method for assessing the effectiveness of using protective barriers near highways to decrease the level of air pollution. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2021. № 6/10 (114). P. 30–39 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, квартиль Q3).*

19. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Mathematical modeling of aeroion mode in a car. *Transport problems*. 2022. Vol. 17, issue 2. P. 19–32. DOI: 10.21307/tp-2020-055 (*видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus, квартиль Q3*).

20. Біляєв М. М., Калашніков І. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Берлов О. В. Математичне моделювання в задачах оцінки ризику на потенційно небезпечних об’єктах: монографія. Дніпро: Журфонд, 2021. 270 с.

21. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Козачина В. А., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD Моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях: монографія. Дніпро: Журфонд, 2022. 268 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

22. Беляева В. В., Якубовская З. Н. Оценка уровня загрязнения атмосферы при авариях. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист:* матеріали VII всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, 20–21 жовтня 2017 р. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. С. 118.

23. Беляев Н. Н., Беляева В. В., Берлов А. В., Гунько Е. Ю., Козачина В.А. Математическое моделирование аварийных ситуаций на химически опасных объектах. *Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України:* матеріали V всеукр. наук.-практ. конф., 30 квітня 2019 р. Київ: НПУ імені М. П. Драгоманова, 2019. С. 20–21.

24. Беляева В. В., Долина Л. Ф., Заика А. А., Дорога О. Г. Математическое моделирование загрязнения атмосферы промышленными выбросами. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем:* матеріали IV міжнар. наук.-техн. конф., 1–2 листопада 2018 р. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2018. С. 39.

25. Беляева В. В., Берлов А. В., Гунько Е. Ю. Компьютерное моделирование загрязнения воздушной среды в рабочих зонах. *Комп'терне моделювання та оптимізація складних систем:* VI міжнар. наук.-техн. конф., 4-6 листопада 2020 р. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2020. С. 21–22.

26. Біляєв М. М., Берлов О. В., Оладіпо М. О., Біляєва В. В., Чередніченко Л. А. Ризик-орієнтовані моделі для рішення задач прогнозування ураження людей при виникненні надзвичайних ситуацій. *Безпека життєдіяльності в XXI столітті:* VIII міжнар. наук.-практ. конф., 19-20 листопада 2020 р. Дніпро, 2020. С. 19–20.

27. Беляева В. В., Берлов А. В., Машихина П. Б. CFD моделирование в прикладних задачах. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур:* IX всеукр. наук. семінар, 20-21 жовтня 2020 р. Харків: ХНУБА, 2020. С. 17–18.

28. Беляева В. В., Патенко А., Берлов А. В. Компьютерное моделирование чрезвычайних ситуаций на транспорте и опасных

производствах. *Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіти*: тези XIV міжнар. наук.-практ. конф., 15-16 грудня 2020 р. Дніпро: ДІІТ, 2020. С. 166–167.

29. Беляева В. В., Новоселец И. С., Берлов А. В. Оценка загрязнения воздушной среды методом компьютерного моделирования. *Priority Directions of Science and Technology Development: abstracts of III internat. scient. and pract. conf.,* November 22-24, 2020. Kyiv, 2020. P. 307–308.

30. Беляева В. В., Берлов А. В., Вовк В. В., Горбунов Ю. А., Горохов А. И. Моделирование экстремальных ситуаций на транспорте. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств:* тези 9-ї міжнар. наук.-практ. конф., 26-27 листопада 2020 р. Дніпро: ДНУЗТ, 2020. С. 13–14.

31. Біляєва В. В., Берлов О. В. Пакет програм «WORK-SAFE2» для моделювання забруднення робочих зон при екстремальних ситуаціях. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи*: матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф., 26 березня 2021 р. Львів: ЛДУБЖД, 2021. С. 5–6.

32. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В. Математичне моделювання наслідків нестаціонарних викидів. *Теоретико-практичні проблеми використання математичних методів і комп'ютерно-орієнтованих технологій в освіті та науці*: зб. матеріалів III всеукр. конф., 28 квітня 2021 р. Київ: ун-т ім. Б. Грінченка, 2021. С. 149–150.

33. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В. Математичне моделювання наслідків екстремальних ситуацій на промислових об'єктах. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні*: міжнар. наук.-техн. конф., 16-18 березня 2021 р. Дніпро, 2021. С. 107–109.

34. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Якубовська З. М. Комп'ютерне моделювання в задачах оцінювання наслідків екстремальних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах. *Комп'ютерне*

моделювання та оптимізація складних систем: VII міжнар. наук.-техн. конф., 3-5 листопада 2021 р. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2021. С. 15–16.

35. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Якубовська З. М. Оцінювання наслідків екстремальних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах методом математичного моделювання. *Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах*: матеріали всеукр. наук.-практ. інтернет-конф., 2-3 листопада 2021 р. Харків: ХНАДУ, 2021. С. 195–197.

36. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Козачина В. А. Чисельні моделі для експрес оцінювання ризику ураження при аварійних ситуаціях. *Trends and Prospects Development of Science and Practice in Modern Environment:* abstracts of X internat. science conf., November 22–24, 2021. Geneva, 2021. P. 326–327.

37. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Русакова Т. І. Екстремальні ситуації на транспорті – моделі для оцінювання ризику ураження персоналу. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств*: матеріали 10-ї міжнар. наук.-практ. конф., 25-26 листопада 2021 р. Дніпро: ДНУЗТ, 2021. С. 16–17.

38. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Вергун О. О., Якубовська З. М. Компьютерне моделювання та пакети програм для експрес оцінювання наслідків аварійних ситуацій. *Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті:* тези XV міжнар. наук.-практ. конф., 16–17 грудня 2021 р. Дніпро: ДІІТ, 2021. С. 57.

39. Біляєва В. В., Машихіна П. Б., Гунько О. Ю. Чисельне моделювання в задачах охорони праці та екологічної безпеки. *Modern Challenges to Science and Practice:* abstracts of III internat. scientific and pract. conf., january 24–26, 2022. Varna, Bulgaria, 2022. P. 553–554.

40. Біляєва В. В., Гунько О. Ю., Машихіна П. Б. Оцінювання ризику ураження персоналу та забруднення навколишнього середовища методом математичного моделювання. *Actual Problems of Practice and Science and*

Methods of its Solution: abstracts of IV internat. science conf., january 31 – february 02, 2022. Milan, Italy, 2022. P. 626.

41. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Русакова Т. І, Берлов О. В., Козачина В. А. Використання математичних моделей в задачах оцінювання наслідків екстремальних ситуацій на промислових об'єктах. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні*: тези доп. XIII міжнар. наук.-техн. конф., 18 травня 2022 р. Дніпро: НМетАУ, 2022. С. 99–100.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

42. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Калашніков І. В. Математичне моделювання затікання токсичного газу у приміщення при аварії на промисловому майданчику. *Математичне моделювання*. 2018. № 2 (39). С. 95–101.

43. Biliaiev M., Kozhachyna V, Biliaieva V., Mutiu Olatoye Oladipo, Chernyatyeva K. Modeling of the atmosphere pollution from coal trains. MATEC Web of Conferences 294, 02007 (2019), EOT-2019. https:// doi.org/10.1051/matecconf/201929402007 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Web of Science).*

44. Biliaiev M. M., Biliaieva V. V., Kozachyna V. A., Berlov O. V., Oladipo M. O., Kirichenko P. S. Reducing of coal dust release from train wagon with barrier. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 985 (2020) 012018, p. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/985/1/012018 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).*

45. Biliaiev M., Biliaieva V., Berlov O., Kozachyna V., Kirichenko P., Oladipo M.O., Poltoratska V. Modeling coal dust dispersion from pile with protection barriers. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 168. P. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202016800021 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Web of Science).*

46. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Oladipo M. Road with fan for reducing exposure to traffic emissions. Proceedings of 25th

International Scientific Conference. Transport Means 2021, October 6-8, Part II, Kaunas, Lithuania, p. 638–643 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).*

47. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Gunko O., Rusakova T. Numerical model for evaluation efficiency of coal pile wetting. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 970 (012037). DOI: 10.1088/1755-1315/970/1/012037 *(видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).*